

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»
Ассоциация «Инновационный территориальный
электротехнический кластер Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы
VII Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2023

УДК 621.3(06)
ББК 31я43
П781

Редакционная коллегия:

В.Г. Ковалев, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);
Г.С. Нудельман, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
А.В. Серебрянников, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета
Чувашского государственного университета*

Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и
П781 энергоэффективности: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. –
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. – 588 с.

ISBN 978-5-7677-3705-5

Представлены статьи и доклады седьмой Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-3705-5

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Чувашский госуниверситет
им. И.Н. Ульянова, 2023

I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Осокин В.Л., Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Россия

***Аннотация.** Показано, что теория нечётких множеств позволяет описывать системы современного электроснабжения, оперировать с нечёткими знаниями и делать нечёткие выводы, моделируя плавное, постепенное изменение свойств и качественных связей. Приведены примеры. Рассмотрены классы нечётких мер и проанализированы неопределённости в задачах принятия решений*

***Ключевые слова:** электроэнергетика, электроснабжение, неопределённость, нечёткая логика, надёжность*

Вводные замечания

Принятие оптимальных или близких к ним решений в условиях функционирования и эксплуатации развивающихся интеллектуальных электроэнергетических систем (ИЭС) и систем электроснабжения (СЭС) всех классов напряжения связано с недостатком неточностью и неопределенностью информации для задач контроля и управления ими. Процессы в ИЭС (СЭС), запущенные энергетическим переходом, приводят к переосмыслению принципов, заложенных при их создании, что включает учёт возможных режимов систем распределённой генерации (РГ), возобновляемых источников энергии (ВИЭ), накопителей электроэнергии (НЭЭ), активных потребителей, а также управления спросом, надёжности, безопасности, гибкости, живучести, экономичности.

При этом предлагается использовать методы «мягких» вычислений, сущность которых в том, что в отличие от «жестких» (детерминированных) вычислений, они нацелены на приспособ-

ление к неточности. Исходными моделями для них служат результаты применения вероятностных методов, нечеткой логики и нечётких множеств [1].

Постановка задачи

Неопределённость информации, необходимой для принятия решений по созданию, контролю и управлению современными ИЭС (СЭС) определяется неравномерностью выдачи мощности ВИЭ и, соответственно, электропотребления, высокой скоростью протекания переходных процессов и изменением нормальных режимов, а также недостоверностью показателей надёжности [2]. Замена количественных показателей качественными понятиями является субъективной и допустима только в конкретных ситуациях, что резко ограничивает применимость классических качественных оценок. Поскольку в реальных ситуациях принятия решений цели, ограничения, критерии выбора в большей части субъективны и точно не определены, возникает необходимость использования нечеткой логики, нечетких множеств и отношений, позволяющих моделировать плавное, постепенное изменение свойств и качественных связей.

Это позволяет обрабатывать и использовать информацию о параметрах, ранее не учитываемых из-за отсутствия средств их измерения. Кроме того, появляется возможность перевода нечетких, качественных оценок на четкий алгоритмический язык [1], что открывает перспективы и возможности повышения эффективности принимаемых решений. Пример реального существования некоторых классов нечётких мер, используемых при принятии решений в условиях проектирования и эксплуатации ИЭС (СЭС) приведён на рис. 1.

Однако чётких границ этих мер реально не существует. Класс вероятностных мер переходит в класс мер правдоподобия и доверия, но не пересекается с классами мер возможности и необходимости. Преимущества применения нечётких множеств заключаются в возможности оперировать нечеткими входными данными, нечеткой формализацией критериев оценки и сравнения, использования качественных оценок с достаточной степенью их достоверности, моделирования ИЭС (СЭС) на основе их сравнительного анализа.

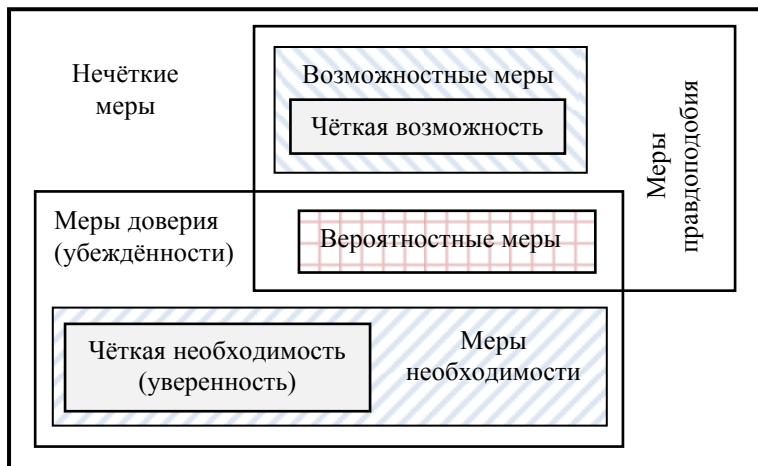


Рис. 1. Некоторые классы нечётких мер

Обсуждение результатов

Задачи, содержащие неопределённости, принято различать по следующим видам.

Неопределённость целей (нечёткая формулировка, либо отсутствие или многоцелевой характер). Для ИЭС (СЭС) цель «обеспечение надёжности электроснабжения» нечёткая, так как необходимо задание уровня надёжности разных потребителей в разных условиях работы. Кроме надёжности задаются: «экономичность», «качество электроэнергии», «недопустимость опасных воздействий на окружающую среду», «удобство эксплуатации», что определяет многоцелевое принятие решений.

Неопределённость параметров и структуры ИЭС (СЭС) и неопределённость внешней среды (невозможность точно предсказать значение нагрузки в каком-либо узле ИЭС (СЭС) в определённый момент времени).

Неопределённость действий партнёра (игрока) на рынке, «противника» (специфика в возможности прогнозирования поведения субъектов рынка электроэнергии и мощности, владеющих собственностью и (или) управляющих ею).

Наиболее важные для задач принятия решений виды неопределённости представлены деревом графа рис. 2.

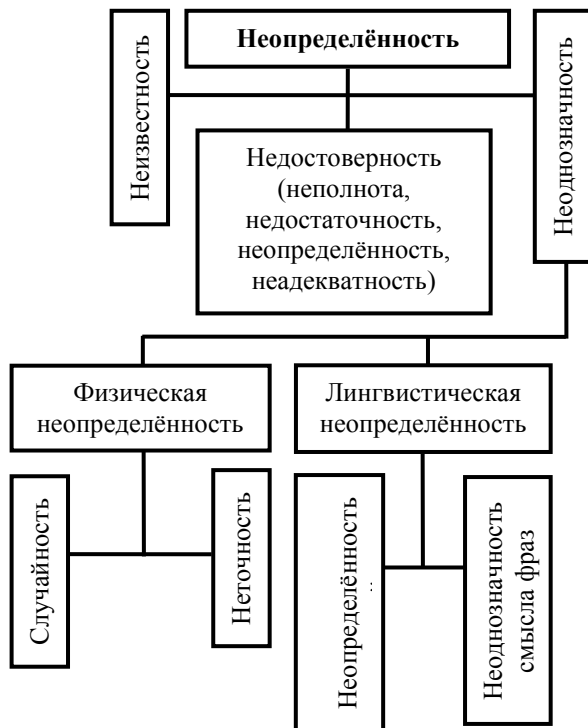


Рис. 2. Неопределённости описания задач принятия решений

Первый его уровень образован терминами, качественно характеризующими количество отсутствующей информации об элементах задачи принятия решений. В начальной стадии информация о ней практически отсутствует. На определённом этапе её сбора может оказаться, что собрана ещё не вся возможная (неполнота), не вся необходимая (недостаточность) информация; для ряда элементов определены лишь множества, которым эти описания принадлежат (неопределённость); ряд элементов описан по аналогии с уже решавшимися задачами и имеется лишь «замещающее» описание (неадекватность).

Второй уровень (рис. 2) описывает источники (причины) неоднозначности описания, которыми являются внешняя среда

(физическая неопределённость) и используемый ЛПР профессиональный язык (лингвистическая неопределённость).

Физическая неопределённость связана с наличием нескольких возможностей, каждая из которых случайным образом становится действительностью (случайность), и с неточностью измерений, выполняемых приборами. Отнесение случайности и неточности к неоднозначности предполагает знание законов распределения вероятностей. Учёт физической неопределённости усложняется появлением лингвистической неопределённости в описании вероятностного распределения.

Лингвистическая неопределённость порождается множественностью значений слов (понятий и отношений) языка и неоднозначностью смысла фраз для описания множества ситуаций, возникающих при принятии решений.

Пример 1. При планировании роста потребляемой мощности P (МВт) в узле нагрузки установлено, что множество возможных значений её роста лежит в пределах $0 < P < 90$ МВт. Функции принадлежности нечетких множеств (варианты прогнозируемого изменения потребляемой мощности): «минимальный – менее 40», «средний – от 20 до 60», «максимальный – более 60» уровни определены экспертно и заданы с дискретизацией 10 МВт.

В результате получены функции принадлежности [1, 3]:
при минимальном варианте роста нагрузок:

$$\mu_{\min}(P) = \{(0/1), (10/0,7), (20/0,5) (30/0,3), (40/0)\};$$

для базового (среднего) варианта роста нагрузок:

$$\mu_{\text{ср}}(P) = \{(20/0), (30/0,5), (40/1) (50/0,5), (60/0)\};$$

при варианте максимального роста нагрузок:

$$\mu_{\max}(P) = \{(40/0), (50/0,25), (60/0,4) (70/0,6), (80/0,75), (90/1)\}.$$

Среди существующих в настоящее время объектов электроэнергетики есть такие, эксплуатационный ресурс которых близок к предельному или даже превысил его. За время эксплуатации эти объекты не раз подвергались экстремальным воздействиям (короткие замыкания, обрывы, токовые и механические перегрузки, экстремальные температурные режимы,

Секция 1

некачественный ремонт и т.п.). В результате возникли проблемы, связанные с возможностью их эксплуатации с пониженными показателями надёжности. Естественно, что с технико-экономической точки зрения не представляется возможным одновременно вывести из эксплуатации все эти объекты и заменить их новыми. Поэтому необходима обоснованная оценка: какие объекты подлежат очередной реконструкции, а какие следует вывести из эксплуатации, полностью заменив новыми [4].

Пример 2. Допустим, оборудование электроустановки не подвергалась отказам, которые не принимались в расчёт при традиционном проектировании. Тогда зависимость степени износа задаётся кривой S_0 (рис. 3). Аналогичные зависимости для «большой S_1 », «довольно большой S_2 », «средней S_3 », «довольно малой S_4 » и «малой S_5 » степеней износа соответственно, представлены соответствующими кривыми.

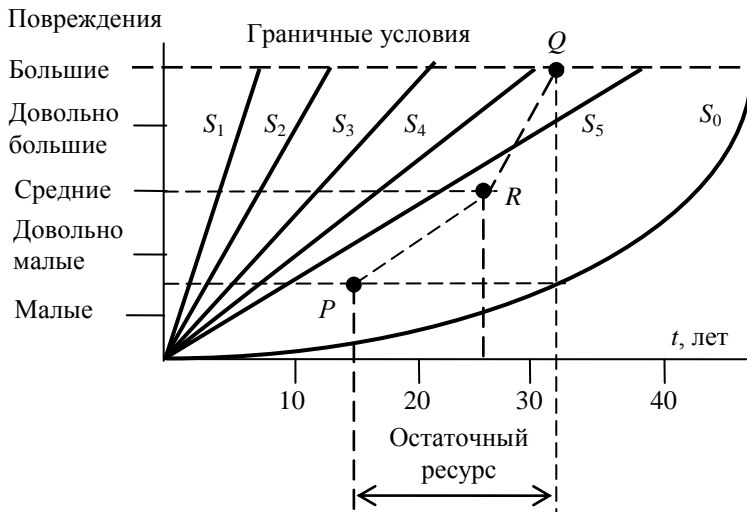


Рис. 3. Зависимость степени повреждений от срока службы и оценка остаточного ресурса

Оценим срок службы подстанции, основное оборудование которой за 15 лет эксплуатации имело «довольно малую» и «ма-

люю» степень повреждения. Состояние этого оборудования показано точкой P на рис. 3. Можно ожидать, что дальнейший рост степени повреждений из состояния P будет происходить параллельно кривой S_4 . После 25-летней эксплуатации процесс увеличения степени повреждений переходит на траекторию, параллельную кривой S_3 и достигает максимума в точке Q . Таким образом, срок службы определяется как разность координат точек P и Q по оси абсцисс.

Выводы

В реальных ситуациях принятия решений цели, ограничения, критерии выбора часто субъективны и точно не определены. В этом необходимость использования нечеткой логики, нечетких множеств и отношений. На примере некоторых классов нечетких мер, используемых при принятии решений в условиях проектирования и эксплуатации ИЭС СЭС) показано, что четких границ не существует. Класс вероятностных мер переходит в класс мер правдоподобия и доверия, но не пересекается с классами мер возможности и необходимости.

Примеры определения зависимости степени повреждений от срока службы и оценка остаточного ресурса, а также процедура оценки надёжности объекта электроэнергетики наглядно показывают возможности математического аппарата теории нечетких множеств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Папков Б.В., Осокин В.Л. Теоретические основы надёжности и эффективности электроснабжения / Б.В. Папков, В.Л. Осокин. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 592 с.

2. Папков, Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Задачи надёжности современного электроснабжения / Б.В. Папков, П.В. Илюшин, А.Л. Куликов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с.

3. Папков, Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков / Б.В. Папков, А.Л.Куликов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 470 с.

4. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Обалин М.Д., Папков Б.В. Выбор очередности реконструкции устройств релейной защиты подстанций по статистическим критериям теории игр // Электричество, 2021, № 5, с. 26–32.

Автор

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и автоматизация», Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. Окончил в 1998 Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия по специальности «Инженер - механик». 07 июля 2011 года защитил кандидатскую диссертацию в диссертационном совете Д 220.070.01 при ФГОУ ВПО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» на тему: «Повышение эффективности функционирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования», по специальности 05.20.02. – электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве. E-mail: osokinvl@mail.ru.

**КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Димитриев А.А., Михеев Г.М., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация: В статье рассмотрен процесс определения результатов хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле с использованием экспертной оценки нейронных сетей. На основе проведенного исследования сделан вывод о применимости нейронных сетей для целей диагностирования технического состояния маслонаполненного электрооборудования.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, силовой трансформатор, техническое диагностирование, хроматографический анализ, экспертные системы.

Одним из эффективнейших способов диагностирования состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования является хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) [1-4]. Данный метод применяется для определения причин возникновения дефектов внутри контролируемого устройства. Посредством ХАРГ возможно локально опре-

Секция 1

делить неисправность во внутренней полости электрооборудования, что позволяет повысить эффективность и достоверность оценки его технического состояния.

Однако процесс диагностирования напрямую зависит от механизма определения и распознавания результатов ХАРГ. Эксплуатационному персоналу необходимо руководствоваться соответствующими нормативными актами, а также обладать богатым опытом и компетенциями по классификации технического состояния силового маслонаполненного электрооборудования [5-7].

С точки зрения упрощения процесса технического диагностирования удобно пользоваться экспертными системами, которые в своей работе помогают интерпретировать результаты анализа и испытаний электрооборудования. Знания экспертной системы формируются на основе опыта специалистов-исследователей и рассмотрения аналогичных случаев [8].

Такая система способствует оценке состояния электрооборудования без участия человека. Стоит отметить, что современное развитие технологий позволяет с помощью методов искусственного интеллекта (ИИ) и обработки данных испытаний и измерений силового трансформатора создавать указанные экспертные системы [4].

Рассмотрим возможный вариант использования экспертной системы, основанной на работе искусственной нейронной сети (ИНС) для определения технического состояния по результатам ХАРГ на примере одного трансформатора. Далее рассмотрены и проанализированы результаты исследования газосодержания трансформаторного масла, проведенные в течение периода времени с 2009 г. по 2020 г. для этого высоковольтного электрического аппарата, установленного в Московской области на подстанции 110 кВ.

В качестве программной основы для создания экспертной системы в исследовании было использовано бесплатное приложение *Deductor Academic 5.3 Build 0.46* [9]. Это приложение обладает множеством инструментов для обработки исходных сведений, в том числе и искусственной нейронной сетью. Данные были предварительно обработаны программными средствами, встроенными в приложение *Deductor Academic*, с целью повышения их качества и достоверности.

Секция 1

Входными данными для обучения ИНС является таблица результатов ХАРГ. В качестве выходного экспертного значения определяются три индекса состояния силового трансформатора [1]:

- нормальное (содержание растворённых газов не выходит за пределы допустимых значений). Далее, это состояние будем обозначать символом А1;

- требующего внимания (не превышает предельных допустимых значений) в дальнейшем, это состояние везде будет обозначаться А2;

- аварийное (выходит за пределы допустимых значений). Это состояние впредь будем обозначать символом А3.

Значения характерных газов в объёмных долях, % от общего объема, которые упорядочены по датам отбора проб масел, приведены на рис. 1. Здесь же указаны их индексы состояния.

Дата	H2	CH4	C2H4	C2H6	C2H2	CO	CO2	A1	A2	A3
11.02.2010	0.003	0.0005	0.001	0.0005	0.0007	0.015	0.33	1	0	0
23.07.2010	0.002	0.0003	0.0005	0.001	0.0008	0.011	0.13	1	0	0
12.11.2010	0.003	0.0005	0.0008	0.001	0.0005	0.015	0.19	1	0	0
19.05.2011	0.004	0.0007	0.0012	0.0002	0.0004	0.013	0.2	1	0	0
22.11.2011	0.004	0.0008	0.0012	0.0002	0.0003	0.02	0.27	1	0	0
17.05.2012	0.005	0.0007	0.0011	0.0002	0.0003	0.014	0.28	1	0	0
27.11.2012	0.011	0.0194	0.0429	0.0038	0.0029	0.014	0.28	0	0	1
28.11.2012	0.011	0.0196	0.0439	0.0039	0.0027	0.014	0.29	0	0	1
27.03.2013	0.005	0.0132	0.038	0.0035	0.0022	0.011	0.25	0	0	1
22.05.2013	0.005	0.0104	0.0344	0.0034	0.0022	0.012	0.27	0	0	1
31.10.2013	0.004	0.0048	0.0261	0.0026	0.0011	0.013	0.23	0	1	0
30.01.2014	0.004	0.0038	0.0239	0.0026	0.001	0.012	0.27	0	1	0
27.02.2014	0.004	0.0036	0.0235	0.0025	0.0011	0.011	0.28	0	1	0
17.04.2014	0.005	0.0031	0.0219	0.0024	0.0009	0.011	0.25	1	0	0
25.04.2014	0.001	0.0002	0.0016	0.0002	0.0001	0.001	0.02	1	0	0
25.04.2014	0.015	0.002	0.0032	0.0003	0.0023	0.001	0.03	0	0	1
21.05.2014	0.001	0.0004	0.0029	0.0003	0.0003	0.003	0.08	1	0	0
26.08.2014	0.005	0.0006	0.0032	0.0004	0.0001	0.008	0.12	1	0	0
17.12.2014	0.003	0.0006	0.0028	0.0003	0.0003	0.007	0.13	1	0	0
24.02.2015	0.004	0.0006	0.0029	0.0004	0.0003	0.007	0.14	1	0	0
25.08.2015	0.006	0.001	0.0027	0.0004	0.0008	0.01	0.17	1	0	0
09.10.2015	0.007	0.0013	0.0026	0.0004	0.0005	0.013	0.18	1	0	0
29.12.2015	0.006	0.0013	0.0027	0.0005	0.0006	0.012	0.2	1	0	0
30.03.2016	0.005	0.0012	0.0028	0.0004	0.0007	0.011	0.21	1	0	0
03.10.2016	0.005	0.001	0.0025	0.0004	0.0006	0.016	0.28	1	0	0
07.03.2017	0.003	0.0007	0.0024	0.0004	0.0006	0.007	0.23	1	0	0
07.11.2017	0.005	0.0009	0.0026	0.0005	0.0011	0.01	0.25	0	1	0
13.11.2017	0	0	0.0001	0	0	0.001	0.02	1	0	0
21.11.2017	0	0.0001	0.0002	0	0	0.001	0.03	1	0	0
16.05.2018	0.002	0.0002	0.0004	0	0.0005	0.004	0.09	1	0	0
28.05.2018	0.003	0.0003	0.0005	0.0001	0.0007	0.005	0.1	1	0	0
09.06.2018	0.004	0.0004	0.0006	0.0001	0.0008	0.005	0.11	1	0	0
20.06.2018	0.003	0.0003	0.0005	0.0001	0.0007	0.005	0.1	1	0	0
23.07.2019	0.003	0.0004	0.0007	0.0001	0.0007	0.007	0.12	1	0	0
23.08.2018	0.004	0.0005	0.0007	0.0001	0.0001	0.009	0.14	1	0	0
23.11.2018	0.004	0.0006	0.0009	0.0001	0.0015	0.007	0.14	0	1	0
05.12.2018	0.003	0.0006	0.001	0.0001	0.0017	0.006	0.13	0	0	1
12.11.2019	0.004	0.0009	0.0015	0.0002	0.0015	0.021	0.21	0	0	1
12.12.2019	0.005	0.001	0.0018	0.0002	0.0017	0.015	0.23	0	0	1
13.12.2019	0.004	0.0008	0.002	0.0011	0.0025	0.017	0.2514	0	0	1
13.01.2020	0.0101	0.0012	0.0026	0.0008	0.0024	0.016	0.2689	0	0	1
14.02.2020	0.0087	0.001	0.0024	0.0009	0.0021	0.0133	0.2402	0	0	1
14.02.2020	0.004	0.0009	0.0016	0.0002	0.0017	0.014	0.23	0	0	1
24.04.2020	0.004	0.0009	0.0017	0.0002	0.0012	0.012	0.25	0	1	0
04.09.2020	0.0005	0.0003	0.0016	0.0002	0.0001	0.007	0.08	1	0	0
22.10.2020	0.003	0.0007	0.0016	0.0002	0.001	0.011	0.24	1	0	0

Рис. 1. Результаты проведенного исследования хроматографического анализа трансформаторного масла рассматриваемого преобразователя напряжения, упорядоченные по датам (указано 46 строк)

Секция 1

Обучение ИНС проводилось с помощью алгоритма *RProp* (<https://basegroup.ru/community/articles/rprop>), условия завершения обучения менялись эмпирически в зависимости от динамики уменьшения и стабилизации ошибок. Количество циклов (эпох) обучения достигало 10000. Структура сети представляет собой четырехслойный перцептрон (рис. 2) с 7 входными нейронами, двумя скрытыми слоями с 15 и 10 нейронами соответственно, а также 3 выходными нейронами, соответствующими целевой функции – три состояния силового трансформатора. Тестовое множество составляет 40 % случайно выбранных строк из исходной выборки. Обучающее множество составляет все остальные строки выборки.

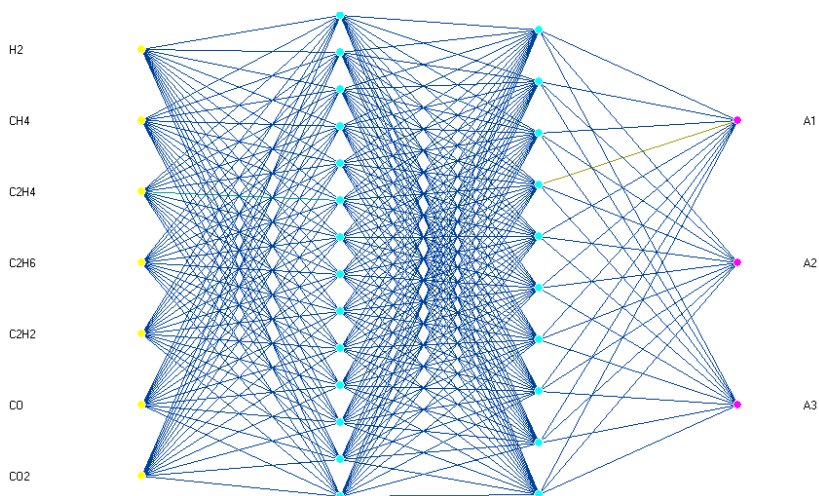


Рис. 2. Граф нейронной сети с входным слоем (7 величин), скрытым слоем (14 и 10 нейронов) и три нейрона с выходными данными

Показатель распознавания индексов состояния силового трансформатора с помощью обученной нейронной сети довольно высок. Наглядным свидетельством этого утверждения является таблица сопряженности, обработанных входных данных, показанная на рис. 3.

Данный рисунок показывает, что нейронная сеть определяет все три индекса технического состояния – «Авария», «Нормальное состояние», «Требующее внимание». По нашему мнению,

A1			
Классифицировано			
Фактически	0	1	Итого
0	18		18
1		28	28
Итого	18	28	46

A2			
Классифицировано			
Фактически	0	1	Итого
0	40		40
1		6	6
Итого	40	6	46

A3			
Классифицировано			
Фактически	0	1	Итого
0	34		34
1		12	12
Итого	34	12	46

Рис. 3. Таблицы сопряженности на примере входных данных для каждого индекса состояния силового трансформатора

это обстоятельство даёт право утверждать, что нейронная сеть позволяет с достаточной точностью проводить техническое диагностирование маслонаполненного электрооборудования.

Выводы

В статье рассмотрен процесс определения результатов хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле на основе экспертной оценки нейронных сетей. На основе проведенного исследования сделан вывод о применимости нейронных сетей для целей диагностирования технического состояния электрооборудования:

1. В ходе исследования выявлено, что на основе экспертной оценки искусственных нейронных сетей возможно определять состояние силового трансформатора по предварительным полученным данным хроматографического анализа
2. Смоделирована экспертная система на основе искусственной нейронной сети в программной среде *Deductor Academic 5.3 Build 0.71*. Применение данного алгоритма ИИ позволяет эффективно определять техническое состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования по результатам ХАРГ.
3. Автоматизации процесса технического диагностирования силового маслонаполненного оборудования способствует применение ИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михеев, Г.М.* Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования / Г.М. Михеев. – Саратов: Профобразование, 2017. – 297 с. – ISBN 978-5-4488-0089-4. – EDN ZGJXYR.

2. *Михеев, Г.М.* Трансформаторное масло: Учеб. пособие / Г.М. Михеев; М-во образования Рос. Федерации. Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – ISBN 5-7677-0731-6. – EDN QMICXX.

3. *Хуснутдинов Р.Р., Хисамеев А.М.* Искусственные нейронные сети в диагностике и мониторинге электрооборудования, отказы // Вопросы науки и образования. 2019. № 4(49). – С. 22–24.

4. *Туктерева, К.О.* Выявление дефектов силовых трансформаторов на основе результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / К.О. Туктерева, А.А. Димитриев, Г.М. Михеев // Молодежь и инновации: Материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Чебоксары, 10 марта 2023 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2023. – С. 554–558.

5. Диагностика состояния контактных систем РПН силовых трансформаторов путем цифрового осциллографирования / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Батальгин, Ю.А. Федоров // Промышленная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 20–22.

6. *Батальгин, С.Н.* Комплексное обследование силовых трансформаторов / С.Н. Батальгин, Г.М. Михеев, В.М. Шевцов // Кибернетика электрических систем: Материалы XXVI сессии Всероссийского семинара «Диагностика энергооборудования», Новочеркасск, 21–24 сентября 2004 года / Ответственный редактор А. С. Засыпкин. Том Часть 1. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет, 2004. – С. 14–16.

7. *Михеев, Г.М.* Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора / Г. М. Михеев, Ю.А. Федоров, Г.М. Михеев // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 41–47.

8. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.

9. Платформа Loginom. Официальный сайт компании BaseGroup Labs [Электронный ресурс]. URL: <https://basegroup.ru/deductor/description/> (дата обращения: 23.06.2023).

Авторы:

Димитриев Антон Анатольевич, аспирант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: Meterling21@mail.ru.

Михеев Георгий Михайлович, доктор технических наук, профессор Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова.

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСЕТЬЮ В ЗАДАЧАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

***Аннотация.** Рассматривается программно-моделирующий комплекс системы управления энергосетью и её элементами. Разработанные алгоритмы и методы управления использованы в составе программно-моделирующего комплекса для управления энергосетью и энергетическим оборудованием. Показано, что для построения системы технологического управления региональной сетевой компании возможно использовать техническую и информационную основу иерархической автоматизированной информационно измерительной системы контроля и учета электроэнергии.*

***Ключевые слова:** энергосеть, управление, прогнозирование нагрузки, нейронные сети, надежность систем энергоснабжения.*

Введение и постановка задачи

Принятие Правительством РФ Энергетической стратегии до 2030 года, утвердило Положение ОАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [1]. В них определена главная интеллектуальная задача – создание электросетей с использованием технологий «Smart Grid». SMART – технология самодиагностики, анализа и отчета, а Grid – энергосистема [1-3]. Создание такой технологии предназначается для решения задач повышения надежности и эффективности общей энергосети с распределенными генерирующими комплексами и требует применение новых методов автоматического и интеллектуального управления [4-6]. К такого рода технологиям относятся: мониторинг состояния и управления электротехническим оборудованием; автоматизированный учет и информационные системы потребителей.

Управление энергосетью можно организовать в виде многоуровневой системы управления. В таком случае, верхний уровень решает задачу управления в рамках всей энергосети, а последующие для локальных участков или непосредственно для локальных элементов этой энергосети (рис. 1), таких как генерирующие или распределяющие электроэнергию элементы.

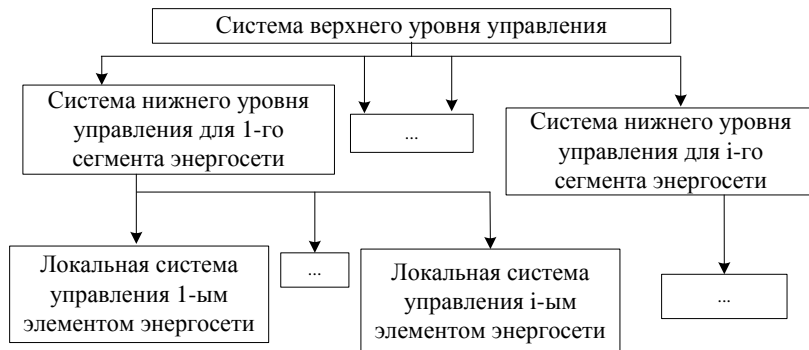


Рис. 1. Блок-схема системы управления энергосетью

Задания по мощности для каждого элемента сегмента энергосети формируются на втором уровне системы управления. Для их формирования применяется алгоритм распределения, обеспечивающий минимум СКО текущего баланса мощностей. Указанный алгоритм реализуется с помощью псевдообратной матрицы. На нижнем уровне происходит управление элементами энергосети, а именно – электростанциями. Представим электростанцию как источник генерации – синхронный генератор, и синтезируем регулятор способный удовлетворить потребность верхнего уровня управления.

Моделирование работы системы управления

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из следующих блоков: А1, А2, А3 – трехфазная трансформаторная группа; Q1, Q2, Q3 – трехполюсный выключатель; L1 – трехфазная линия электропередач; А4 – блок датчиков тока и напряжения; М1 – машина постоянного тока; G2 – машина переменного тока; G3 – источник питания двигателя постоянного тока; G4 – возбудитель машины переменного тока; А5 – терминал; А6 – блок ввода-вывода цифровых сигналов; А7 – коннектор.

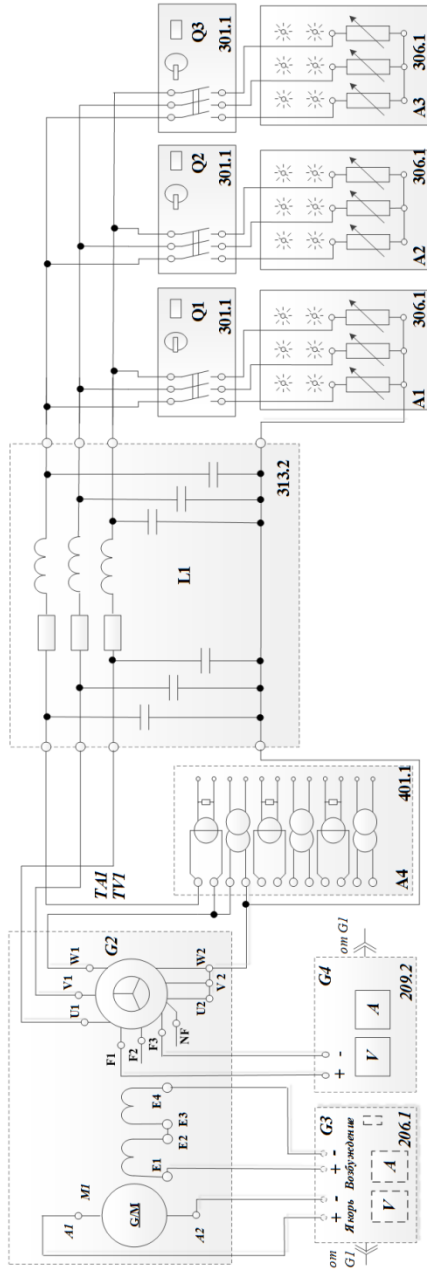


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки

Секция 1

Управление производилось с использованием синтезированного регулятора, разработанного в ходе выполнения проекта. В качестве турбины использовался ДПТ, для получения необходимого момента на валу генератора определялась и задавалась необходимая частота вращения вала ДПТ с учетом математической модели:

$$\begin{cases} u = e + Ri + L \frac{di}{dt} \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \\ M = C_m \Phi i \\ e = C_\omega \Phi \omega \end{cases}$$

где u – напряжение на якорной обмотке двигателя, e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря, R – активное сопротивление якорной цепи, i – ток якоря, M – электромагнитный момент двигателя, M_c – момент сопротивления движению, J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки, ω – скорость вращения вала двигателя, C_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом, Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения, C_ω – коэффициент связи между скоростью и ЭДС.

Дополнительно к управлению СГ необходимо задать определенное количество оборотов вала ДПТ, для управления этим параметром синтезирован регулятор:

$$\begin{cases} i_0 = \frac{Mc}{C_\omega \Phi} - \frac{J}{C_\omega \Phi} \cdot a_1 (\omega - \omega_0) \\ u = iR + C_\omega \Phi \omega - a_2 L(i - i_0) \end{cases}$$

Управление происходит регулированием напряжения, подаваемого на якорную обмотку ДПТ. Вычисление управления происходит в два этапа: на первом этапе вычисляется ток i_0 , необходимый для того, чтобы поддержать требуемую частоту ω_0 , на втором этапе происходит расчет необходимого напряжения. Основными параметрами регулятора являются коэффициенты a_1 и a_2 .

При ПИД-управлении для автоматического регулирования скорости вращения ротора ДПТ и генерируемого напряжения

Секция 1

СГ применяются два стандартных блока из программы. Для регулирования оборотов и поддержания их номинального значения 1500 оборотов в минуту используется управление напряжением якоря ДПТ в диапазоне 40 – 250 В. Для регулирования выходного напряжения СГ используется напряжение возбуждения СГ в диапазоне 0 – 40В. Эксперимент заключался в запуске и остановке ДПТ при работе СГ на холостом ходу. Результаты представлены на рис. 3, 4.

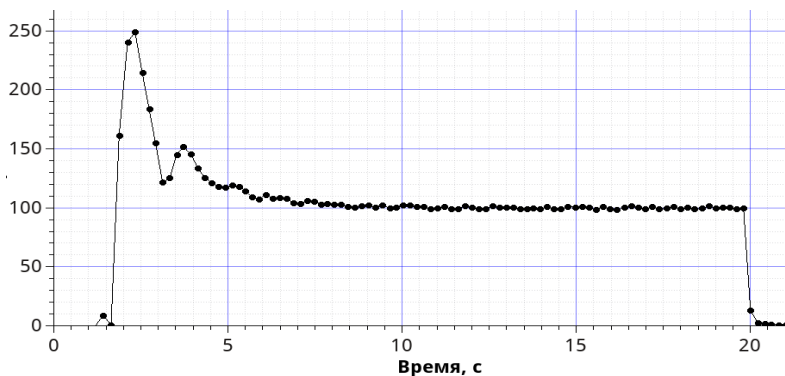


Рис. 3. Пуск и отключение ДПТ, при ПИД-регулировании оборотов СГ и выходного напряжения на уровне 100, В, а—напряжение

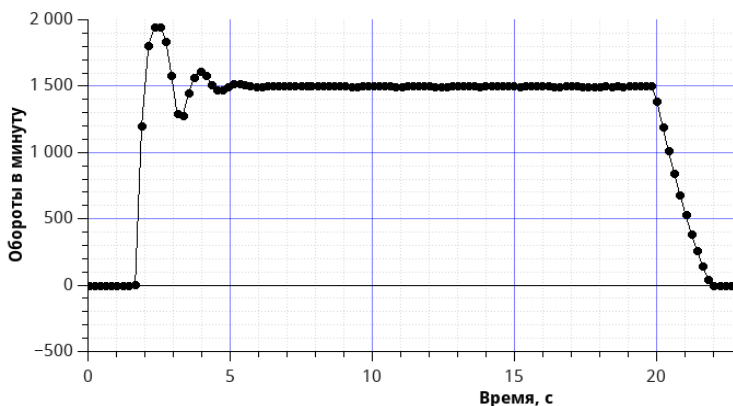


Рис. 4. Обороты СГ при ХХ, пуск и отключение ДПТ, при ПИД-регулировании оборотов и выходного напряжения СГ на уровне 100, В

Выводы

Представленные эксперименты моделируют работу синхронного генератора электростанции при включении СГ и его работе на холостом ходу (ввод генератора в работу). Сравнивая переходные процессы по напряжению, току и частоте вращения при ПИД-регулировании и работе базового регулятора (рис. 4, б), можно сделать вывод, что при одинаковом времени переходного процесса, длительность которого составляет около 4-5 секунд, при управлении с ПИД-регулятором происходит краткое перерегулирование, по напряжению на 150% номинального значения, по току на 50%, по частоте вращения до максимального значения 2000 об/мин. Такое перерегулирование является близким к критическому, поэтому попытка выхода на напряжение СГ уже превышает значения уставок. В нормальном режиме система с базовым регулятором демонстрирует большую стабильность и уменьшение отклонений от номинальных значений на 10–15%, но при ПИД-регулировании и при работе базового регулятора значения этих отклонений лежат в рамках допустимых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение ОАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». – М.: ОАО «Россети», 2013.
2. Полуянович Н.К., Тибейко И.А. Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Южный Федеральный Университет, Инженерно-технологическая академия, Институт радиотехнических систем и управления, Кафедра электротехники и мехатроники. Таганрог, 2014.
3. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с
4. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Азаров Н. В.1, Огреничев А.В. Прогнозирование ресурса электроизоляционных материалов силовых кабелей с использованием метода искусственных нейронных сетей. монография / Ростов-на-Дону; Таганрог, 2022. С. 116.
5. Дубяго М.Н. Полуянович Н.К. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса изоляции кабельных линий. ж. Известия ЮФУ. Технические науки. №3 2019. С.132-143.

Секция 1

6. Дубяго М.Н. Полуянович Н.К. Алгоритм обучения искусственной нейронной сети факторного прогнозирования ресурса изоляционных материалов силовых кабельных линий. ж. Известия ЮФУ. Технические науки. №2 2021. С.59-73.

Авторы:

Полуянович Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Факультет микроэлектроники и электронной техники Таганрогского радиотехнического института окончил в 1983 году. Диплом кандидата технических наук КД №050465 выдан 15 января 19892 года по теме «Эквивалентные преобразования в линейных и нелинейных схемах замещения электрических цепей». E-mail: nik1-58@mail.ru.

Дубяго Марина Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Окончила Южный федеральный университет в 2015 году. В 2022 году получила ученую степень кандидата технических наук по теме Методы диагностики и прогнозирования остаточного ресурса кабельных линий в распределительных электрических сетях 6-10 кВ. E-mail: w_m88@mail.ru.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А.М., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Диагностика изоляции современных станций и подстанций, особенно цифровых подстанций нового поколения, является актуальной задачей. Работоспособность и срок службы высоковольтного электрооборудования обусловлена состоянием всех его элементов, включая жидкую и твердую изоляции. В статье предложен программно-аппаратный комплекс для диагностики изоляции силовых трансформаторов цифровых подстанций на основе метода частичных разрядов.*

***Ключевые слова:** метод частичных разрядов, диагностика изоляции силового трансформатора, отыскание мест повреждений силового трансформатора, автоматизация диагностики состояния силового трансформатора, мониторинг оборудования цифровых подстанций.*

Перечислим некоторые методы оценки состояния трансформаторного масла: метод повышенного пробивного напряжения, метод фуksiновой пробы, хроматографический анализ состава масла. Для оценки состояния бака и вводов трансформатора применяется, например, тепловизионный контроль. Для оценки омического сопротивления вводов трансформатора применяется метод мегаомметра. Сопротивление опорных изоляторов также определяется мегаомметром, а их электрическая прочность в большинстве случаев не может быть определена ввиду огромного пробивного напряжения. Ограничением этих методов для применения на цифровых подстанциях является необходимость отключения приложенного напряжения. Проблема практической реализации метода частичных разрядов (ЧР) заключается в том, что характеристики ЧР для обоснования проведения определенных видов профилактических работ, например, связанных с концевыми муфтами кабелей, не могут быть регламентированы по причине малой научной базы. Производители оборудования, связанного с регистрацией и анализом характеристик частичных разрядов (например, «Димрус»)

Секция 1

так и заявляют, что интерпретация полученных характеристик ЧР не является их вопросом, а остается за исследователями.

Оценка состояния изоляторов высокого и сверхвысокого напряжения еще более проблематично на практике по сравнению с диагностикой изоляции оборудования среднего напряжения ввиду невозможности достичь пробивного напряжения, которое, в зависимости от номинала, составляет сотни киловольт и более.

Поэтому в последнее время, например, опорные изоляторы силовых трансформаторов диагностируют комбинируя несколько методов. Так, например, совместно применяют метод ЧР и виброконтроль, или несколько частотных диапазонов регистрации ЧР, однако четкой взаимосвязи между механической прочностью, электрической прочностью, омическим сопротивлением, тепловым сопротивлением и характеристиками частичных разрядов не обнаружено.

Тепловизионный контроль силовых трансформаторов является вспомогательным методом диагностики, который, наряду с традиционными методами (измерение омического сопротивления изоляции, тока холостого хода, хроматографический анализ газового состава в масле и др.) дает дополнительную информацию о состоянии силовых трансформаторов. Тепловизионный контроль силовых трансформаторов показал, что с его помощью можно выявить нарушения изоляции отдельных элементов трубопровода, например, консолей, шпилек, нарушение работы систем охлаждения (масляных насосов, фильтров, вентиляторов и т.п.), изменение циркуляции масла в баке трансформатора в результате шлакообразования, конструктивных нарушений, вздутия или смещения изоляции обмоток (особенно для трансформаторов с длительным сроком службы), нагрев внутренних контактных групп трансформатора, замыкания межвитковой изоляции. Но тепловизионный метод имеет ограничения по чувствительности к динамике развития дефектов, особенно внутренних. Нагрев при нарушении, например, межвитковой изоляции происходит в том числе по причине частичных разрядов, но тепловизионный метод не способен определить этот нагрев.

В связи с появлением элегазовых подстанций традиционные методы контроля изоляции силовых трансформаторов не

работают, поэтому для оценки состояния масляной и элегазовой изоляции цифровых подстанций метод ЧР стал основным. Для оценки состояния элегазовой изоляции в основном применяется метод ЧР в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ) [1].

Известно, что ЧР разрушают изоляцию. В то же время, анализируя характеристики ЧР, можно оценить состояние изоляции. Механизм разрушения изоляции частичными разрядами связан с ее нагревом. Частичные разряды представляют собой искровые стримерные разряды, возникающие в пузырьках газа, растворенных в трансформаторном масле, элегазе, или кавернах твердой изоляции за счет повышенного относительно среднего значения напряженности локального электрического поля. Увеличению напряженности локального электрического поля способствуют молекулы воды в толще изоляции. Одним из факторов, предположительно объясняющего влияние молекул воды на интенсивность и частоту следования ЧР, является дипольная структура молекул воды. Косвенным подтверждением этого предположения является корреляция между так называемыми *water trees* и *electrical trees* в объеме, например, полимерной изоляции и изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Сочетание этих двух факторов: наличие влаги в изоляции и увеличение интенсивности и частоты следования ЧР приводит к ускоренному разрушению изоляции и развитию дефектов, что в свою очередь приводит к увеличению среднего значения напряженности электрического поля до критического и образованию устойчивого проводящего канала внутри изоляции. Контроль содержания влаги в изоляции позволяет косвенно судить о наличии внутри нее развитой дефектной структуры. Отметим, что контроль влаги силовых трансформаторов основан на применении мостовых методов, поэтому невозможен без отключения приложенного напряжения. В связи с этим следует вывод о том, что метод ЧР является единственным пригодным методом для мониторинга изоляции элементов цифровых подстанций.

Отметим, что ЧР приводят к витковым замыканиям изоляции силового трансформатора [2], для распознавания которых разрабатываются автоматические системы контроля изоляции [3], поэтому задача мониторинга ЧР в изоляции силовых транс-

форматоров с точки зрения отыскания мест повреждений является приоритетной задачей.

В настоящее время для мониторинга состояния изоляции масляных трансформаторов применяются, например, системы сбора данных на основе оптоволоконных датчиков температуры Neoptix на базе GaAs. Эти датчики монтируются в обмотки трансформатора на этапе размещения заказа на предприятии-изготовителе, или на этапе вывода трансформатора в ремонт. Датчики объединяются в локальную вычислительную сеть, сервером которой служит специальный блок обработки данных, так называемый Signal Conditioner. Датчики Neoptix способны определять нагрев в обмотках трансформатора с точностью до 0,1 градуса. Эти же оптоволоконные датчики чувствительны к ЧР величиной менее 1 пКл. Блок обработки данных принимает сигналы от 8 датчиков Neoptix, что теоретически позволяет достаточно точно определять место повреждения в баке трансформатора и распознавать повреждения, связанные с межвитковой изоляцией от повреждений в контактных группах. Однако, эта система имеет ряд очевидных недостатков, например, повышение температуры в контактных группах не связана с ЧР.

В связи этим в работе для диагностики изоляции силовых трансформаторов предлагается применить метод ЧР с регистрацией в УВЧ диапазоне ЭМИ в режиме мониторинга с одновременной регистрацией температуры оптоволоконными датчиками Neoptix.

Таким образом предлагается дополнить систему мониторинга силового трансформатора, состоящую из блока сбора данных и датчиков Neoptix, расположив вокруг трансформатора несколько цифровых датчиков ЧР, объединив их в локальную вычислительную сеть с компактным недорогим выделенным сервером на основе микрокомпьютера Raspberry Pi 3. Разработан алгоритм определения места повреждения внутри трансформатора на основе оценки смещения спектра электромагнитного излучения ЧР в УВЧ область ЭМИ. При этом алгоритм реализует сравнение интенсивностей спектра от 8 датчиков ЧР, что позволяет локализовать дефект.

Основой цифрового датчика ЧР является ЧМ-приемник с аудиовыходом и контроллер, обеспечивающий питание прием-

ника и передачу данных на микрокомпьютер. Восемь таких цифровых датчиков объединены в ЛВС. Путем сравнения интенсивностей сигналов с восемью датчиков, определяется место повреждения в баке силового трансформатора.

Поскольку ЧМ-приемники ЭМИ чувствительны только к ЧР, предлагаемая система мониторинга состояния изоляции силового трансформатора является более эффективной по сравнению с системой мониторинга на базе только оптоволоконных датчиков Neoptix.

Выводы

Предлагаемый комбинированный мониторинг характеристик частичных разрядов позволит определять повреждения внутри трансформатора на ранних этапах их возникновения, что важно для цифровых подстанций нового поколения. В будущем такую систему можно будет устанавливать без оптоволоконных датчиков, что актуально для цифровых подстанций нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sikorski W., Walczak K., Gil W., Szymczak C. On-Line partial discharge monitoring system for power transformers based on the simultaneous detection of high frequency, ultra-high frequency, and acoustic emission signals / Energies, 13 (12), 3271.

2. Мустафин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Сиразутдинов Ф.Р., Губаев Д.Ф., Гавриленко А.Н. Разработка метода определения витковых замыканий в обмотке трёхфазного трансформатора / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. – С. 46-58.

3. Сабиров И.И., Гавриленко А.Н. Автоматизированные системы контроля состояния силовых трансформаторов / В сборнике: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань, 2022. – С. 315-317.

Автор

Гатауллин Айрат Мухамедович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры РЗА ФГБОУ ВО «КГЭУ». Окончил физфак КГУ в 1992 году. Ученую степень получил в 2002 году по тематике «Комплексный релаксационный контроль контрастных веществ для магнитной томографии». E-mail: gataullin1969@gmail.com.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ БЕСТРЕНДОВЫХ ШУМОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ И ВЫБОРУ ЛУЧШЕГО ТЕСТОВОГО УСТРОЙСТВА В СРАВНЕНИИ С ЭТАЛОННЫМ ОБРАЗЦОМ

Александров В.С., Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань, Россия

***Аннотация.** В данной работе предлагается новый метод описания бестрендовых шумовых данных, основанный на сравнительном анализе положительных и отрицательных флуктуаций. Применение подхода на реальных данных различных измерительных систем (датчики давления, температуры, транзисторы, фоторезисторы и т.д.) показало высокую точность получаемых результатов.*

***Ключевые слова:** датчик, обработка данных, шумовая спектроскопия, эталонный образец, корреляция, подгоночная функция.*

Анализ данных в настоящее время является одной из приоритетных задач в теории обработки информации и используется повсеместно. Важно не просто регистрировать данные с помощью различных измерительных приборов (датчиков), уметь их обрабатывать, но и иметь возможность оценивать их эффективность, в том числе в обозримом будущем, что экономит как время, так и финансовые затраты. Другой важной задачей является оценка соответствия текущего состояния устройства заданым в сравнении с каким-либо стандартом. Особенно это актуально на производстве, где используется так называемый «светофор» (зеленый свет – штатный режим работы устройства, желтый свет – имеются допустимые отклонения, красный свет – неисправное устройство).

Проблема выбора эталонного устройства в настоящее время стоит достаточно остро. В некоторых случаях учитывается среднее значение (арифметическое, геометрическое, гармоническое и т.д.) всех измеренных значений. В других случаях (наилучший вариант) данные предоставляются производителем соответствующего устройства. Существуют и другие методы выбора эталонного элемента, каждый из которых имеет свои

собственные характеристики и допущения. И, наконец, третья группа задач – это выбор наилучшего устройства из предложенных. Это особенно актуально для конечного пользователя, который хочет «извлечь» максимальную полезность/прибыль из купленного устройства по той же цене, то есть лучшее соотношение цена/качество.

Исследователи, основываясь на своих собственных (и во многих случаях неоправданных предположениях), пытаются обработать множество типов случайных последовательностей и извлечь «информацию», которая, к сожалению, коррелирует с обработками/неконтролируемыми ошибками. В частности, у них возникнут проблемы с анализом «шума» оборудования, который во многих случаях не является гауссовским, равномерным и другими типами шумов, широко используемыми в математической статистике в качестве модельных данных. Следовательно, для описания случайных флуктуаций нам нужен очень точный инструмент, свободный от допущений модели и ошибок обработки. Следует принимать во внимание только экспериментальные погрешности, связанные с измерениями оборудования и влиянием различных неконтролируемых факторов.

В настоящее время существует множество методов, используемых в статистическом анализе для обработки данных, все они имеют свои особенности, преимущества и недостатки, основные из которых сводятся к следующим группам:

1) Наличие неконтролируемой модели и ошибок обработки, обусловленных выбором метода и приблизительной оценкой случайной величины;

2) Требование априорного знания закона распределения для набора выбранных случайных величин и приведение исследуемого массива данных к нормальному закону распределения, руководствуясь центральной предельной теоремой.

В качестве исследуемых измерительных приборов были выбраны фотодиоды типа VL-L3522PD в количестве 10 штук, измерения проводились последовательно. Запись данных о шуме проводилась с использованием измерительного оборудования типа Elvis фирмы National Instruments (NI). Основная задача – обеспечить одинаковые условия для каждого испытания, чтобы все измерения проводились в отсутствие внешнего воздействия:

Секция 1

1) При той же комнатной температуре, равной 25 градусам Цельсия;

2) При таком же подключении датчиков к измерительному блоку ELVIS;

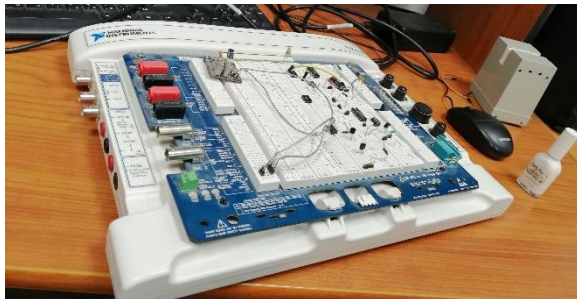
3) При отсутствии воздействия света (каждый раз датчик закрывался непрозрачной крышкой (рисунок б), которая защищала от прямых солнечных лучей и искусственного освещения).

Следует отметить, что для получения более достоверных данных, частично свободных от влияния внешних факторов, была использована процедура цифровой фильтрации. Частоты среза для полосового фильтра были определены из соображений отсеивания неинформативной части с целью получения более четкой картинки, в результате чего процедура фильтрации проводилась в диапазоне 5 Гц-100 кГц. Невозможно не упомянуть тот факт, что в нефильтрованных данных присутствовала постоянная составляющая, которая была подавлена фильтрацией, в то время как смещение оказалось систематически постоянным, что никак не влияет на результаты измерений. Для получения более достоверных результатов каждое измерение проводилось трижды, а затем выбиралось среднее значение. По экспериментальным соображениям частота дискретизации была выбрана равной 500 кГц для всей серии измерений, количество точек данных в каждом нефильтрованном измерении составляло 10^4 , в то время как для отфильтрованных данных количество точек данных было равно $9 \cdot 10^3$. В целом было проведено 60 измерений (10 фотодиодов, фильтрованные и нефильтрованные данные, по три измерения каждого фотодиода). Мы хотели бы еще раз отметить, что все измерения проводились в одинаковых условиях, поэтому влияние внешних факторов незначительно.

На рисунках ниже показана процедура получения данных с помощью прибора ELVIS, описанного выше.

Номинальные значения компонентов выбираются из условия обеспечения наилучших шумовых параметров исследуемой системы и в соответствии с рекомендациями производителя соответствующих электронных микросхем. Прежде всего, необходимо было смоделировать усилительный каскад в электронной среде Multisim для предварительной оценки правильности выбора значений соответствующих компонентов.

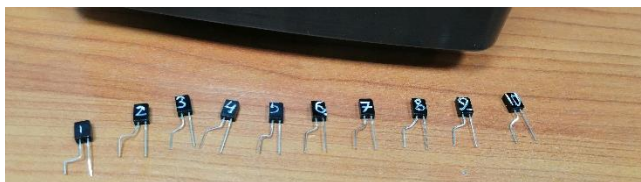
Секция 1



a



б



с

Детали эксперимента: *a* – создание прототипа и экспериментальная установка ELVIS для проведения измерительных работ; *б* – процесс получения экспериментальных данных. Процесс закрытия фотодиода непрозрачной металлической крышкой, позволяющий исключить влияние внешнего света на результаты измерений; *в* – маркированные фотодиоды, которые использовались в процессе измерения.

Использованная маркировка была сделана после эксперимента и не повлияла на полученные результаты

Этот предварительный анализ показал высокую точность функционирования системы. Это необходимо, помимо прочего, для того, чтобы получить теоретическое представление о поведении нашей системы.

Следующей задачей было проведение измерений. При измерении нескольких вычислительных компонентов (устройств, датчиков, микросхем) возможны две схемы подключения - последовательная и параллельная. В нашей работе мы применили первый метод, при котором сигналы от каждого датчика принимаются по очереди. В этом случае возникает проблема обеспечения идентичности внешних условий (температуры, давления, влажности, освещенности и т.д.), а также исключения влияния самой экспериментальной установки на выходные сигналы датчика. Кроме того, необходимо исключить возможность проникновения помехи по сети питания. Все эти моменты требуют детальной проработки до проведения эксперимента.

В этой работе предлагается очень простой метод, который позволяет выбрать наилучший датчик/устройство на основе его статистических характеристик. Метод CAPoNeF (метод сравнительного анализа положительных и отрицательных флуктуаций) является довольно общим; он не использует модельные допущения и свободен от ошибок обработки. Он может быть применен для обработки любой последовательности без тренда, которая может быть измерена с помощью экспериментальной электрической схемы. При проведении измерений необходимо учитывать влияние внешнего «шума». Его влияние может исказить статистические характеристики, которые подвергаются такому типу анализа. Для подавления влияния возможных помех процедура фильтрации становится обязательной. Кроме того, эта процедура позволила исключить постоянную составляющую в тестируемом сигнале. Рекомендуется также проводить измерения в параллельном режиме. Если эта процедура оказывается невозможной (как в нашем случае), необходимо соблюдать строгие корреляции между соседними измерениями, чтобы свети к минимуму влияние внешних помех.

Результаты обработки данных показали высокую точность получаемых результатов и высокую чувствительность предлагаемого подхода.

Результат обработки данных предлагаемым подходом

Number of PHD	$M_2 10^{-6}$	$M_3 10^{-7}$	M_4	$M_5 10^{-4}$	M_6	$M_7 10^{-6}$	M_8	M_9
PhD#1	6.76384	0.6477	3.72277	2.3939	-17930	0.9312	0.97813	199.3
PhD#2	5.38699	-2.4347	3.52471	2.0502	39256	0.8498	0.36011	34.131
PhD#3	8.10737	-6.7073	5.45034	5.648	59819	1.3629	0.12869	86.7494
PhD#4	12.4181	-4.0619	6.989	2.1156	23279	1.7488	0.60554	158.001
PhD#5	16.2477	5.0787	5.80892	5.9095	5214	1.4529	1.31149	309.627
PhD#6	9.92576	-9.896	7.89642	3.8761	31775	1.9761	0.28645	67.9817
PhD#7	3.54714	-2.0308	5.631	8.9722	218300	1.4088	0.09322	86.2009
PhD#8	1.97995	-9.8949	3.512	3.0271	75960	0.8488	0.2772	33.5013
PhD#9	9.34678	-8.6776	8.18108	9.8221	319000	2.0476	0.45801	150.616
PhD#10	11.2936	-4.6427	4.23756	3.7608	130746	1.0593	0.63376	162.594

Изначальное предположение о неправильном режиме работы фотодиода под номером 10 подтвердилось, он не набрал ни одного балла в совокупности корреляционных параметров, следовательно, его можно считать бракованным (красный свет). Лучшим элементом оказался датчик под номером PhD#8, второе место достается сенсору под номером PhD#2. Тройку лидеров замыкает PhD#1. Эти светодиоды входят в «зеленый цвет». Остальным датчикам условно можно присвоить «желтый» режим работы.

В дальнейшем имеет смысл продолжить это исследование и протестировать другие возможные данные предлагаемым подходом по причине простоты и эффективности (по точности и чувствительности), при этом возможно выйти за пределы электротехники и электроники и исследовать, например, биологические шумы.

В данной работе предлагается новый подход к оценке шумовых характеристик измерительных элементов и выбору лучшего устройства из экспериментальных в сравнении с заданным эталонным образцом. Это может быть актуально и найти широкое применение во многих сферах человеческой деятельности, например, в промышленности. Реализация так называемой системы «светофор» позволит в автоматизированном режиме отсеивать бракованные элементы на этапе конвейерного контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Precioso, G.; Navarro, D.; Barran, K.; Gallego, D. Tuna-AI: tuna biomass estimation with Machine Learning models trained on oceanography and echosounder FAD data. Cold Spring Harbor Laboratory 2021, Volume 1, 1–16.
2. Grady, L.; Bekris, L.; Kavvaki, L. Asynchronous Distributed Motion Planning with Safety Guarantees under Second-Order Dynamics. Algorithmic Foundations of Robotics 2010, Volume 1, 13–15.
3. Kausch, S.; Maplass, J.; Spaeder, M. Dynamic Transitions of Pediatric Sepsis: A Markov Chain Analysis. Frontiers in Pediatrics 2021, Volume 9, 1-11.
4. Gzyl, H.; Inverandi, P.; Tagliani, A. Fractional Moments and Maximum Entropy: Geometric Meaning. Communication in Statistics- Theory and Methods 2014, Volume 43(17), 1–7.
5. Raoul R. Nigmatullin and Vadim S. Alexandrov. Application of the Complex Moments for Selection of an Optimal Sensor; MDPI, Sensors 2021, 21(24), 8242; <https://doi.org/10.3390/s21248242>.
6. R.R.Nigmatullin, A.V. Sidelnikov, E.I. Maksyutova, H.C. Budnikov, and E. V. Govorov., Differentiation of Different Sorts of Sugars by the CAPoNeF Method. Electroanalysis (2021), 33, 2508–2515, doi.org/10.1002/elan.202100291.

Автор

Александров Вадим Сергеевич, аспирант 3 года обучения Казанского Национального Исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КНИТУ-КАИ, кафедра РИИТ.

**ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

Минуллин Р.Г., Касимов В.А., Ахметова И.Г., Минкин А.С., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

Аннотация. В работе описаны программно-аппаратные локационные комплексы для мониторинга состояния воздушных линий электропередачи и их функциональные возможности. Приведены способы визуализации результатов зондирования.

Ключевые слова: локационные комплексы, мониторинг состояния линий электропередачи, гололедные отложения.

Локационный метод является многоканальным, позволяет контролировать все линии, отходящие с одной подстанции. При этом грозотросы и фазные провода контролируются по всей длине одинаково эффективно в рабочем и аварийном режимах вне зависимости от наличия сетевого напряжения [1–4].

Разработанная локационная технология позволяет одним программно-аппаратным комплексом решить обе озвученные проблемы (обнаружение повреждений и гололедных отложений на проводах ЛЭП), заменяя многочисленные измерительные методы и средства, применяемые при этом.

Локационные комплексы используют для зондирования высокочастотный (ВЧ) тракт ЛЭП одновременно с аппаратурой ВЧ связи, передающей информацию с систем телемеханики, релейной защиты, автоматики и телефонии. Поэтому программно-аппаратные локационные комплексы не требуют вмешательства в конструкцию ЛЭП и располагаются в помещении подстанции, чем повышается ее надежность и удобство обслуживания. При этом датчики на опорах ЛЭП полностью отсутствуют.

Применение цифрового накопления отраженных сигналов обеспечивает их выделение на фоне сигналов систем ВЧ связи. При появлении гололедных отложений разделение линии на контрольные участки дает возможность определить среди них наиболее аварийно-опасный участок, на котором необходима первоочередная плавка гололеда.

Метод локационного зондирования позволяет выполнять функции систем телемеханики, заменяя сигналы телесигнализации (ТС). При этом текущее состояние линии в режиме «включено» или «отключено» характеризуется соответственно полярностью отраженного импульсного сигнала.

Метод локационного зондирования позволяет выполнять функции систем релейной защиты. При обнаружении повреждения проводов линии поступает сигнал телеизмерения (ТИ) в виде вновь появившегося импульса, величина запаздывания которого определяет расстояние до места повреждения. Причем появившийся импульс при обрывах проводов ЛЭП сохраняет свою

Секция 1

полярность, а при коротких замыканиях этот импульс свою полярность меняет.

При обнаружении гололедных отложений сигналами ТИ являются данные о значениях амплитуды и запаздывания импульсов, отраженных от конца линии, которые затем пересчитываются в пункте управления (диспетчерском пункте) в эквивалентную массу гололедных отложений [5].

За истекшее время в КГЭУ изготовлено 11 вариантов программно-аппаратных локационных комплексов в стационарном и мобильном модификациях для выполнения научных исследований и отработки технологии локационного мониторинга ЛЭП [1, 3].

В настоящее время изготовленные комплексы внедрены на 6 подстанциях России. Комплексы впервые с 2009 г. осуществляют непрерывный локационный мониторинг ЛЭП 35–330 кВ. Зондирование воздушных ЛЭП происходит в автономном автоматическом режиме через 15–60 мин.

Результаты зондирования передаются в реальном времени через локальные сети диспетчерам подстанций и через GSM канал на мониторы Центра мониторинга КГЭУ без ограничения расстояния, обеспечивая в удобном интерфейсе в реальном масштабе времени наблюдение за динамикой гололедообразования на проводах ЛЭП и за динамикой освобождения проводов от гололедных отложений при их плавке.

Через Центр мониторинга КГЭУ происходит при необходимости коррекция управлением локационными комплексами через систему удаленного доступа, а также сбор локационной информации с подстанций с последующим анализом и архивацией. В настоящее время зарегистрировано более 3 млн. рефлектограмм.

Результаты зондирования визуализируются на экранах мониторов диспетчерских пунктов и в Центре мониторинга КГЭУ тремя способами.

Способ №1 (рис. 1). Визуальный контроль текущего состояния проводов ЛЭП осуществляется в виде многоканальной регистрации в режиме месячной стековой памяти значений затухания и запаздывания отраженных локационных импульсов.

Секция 1

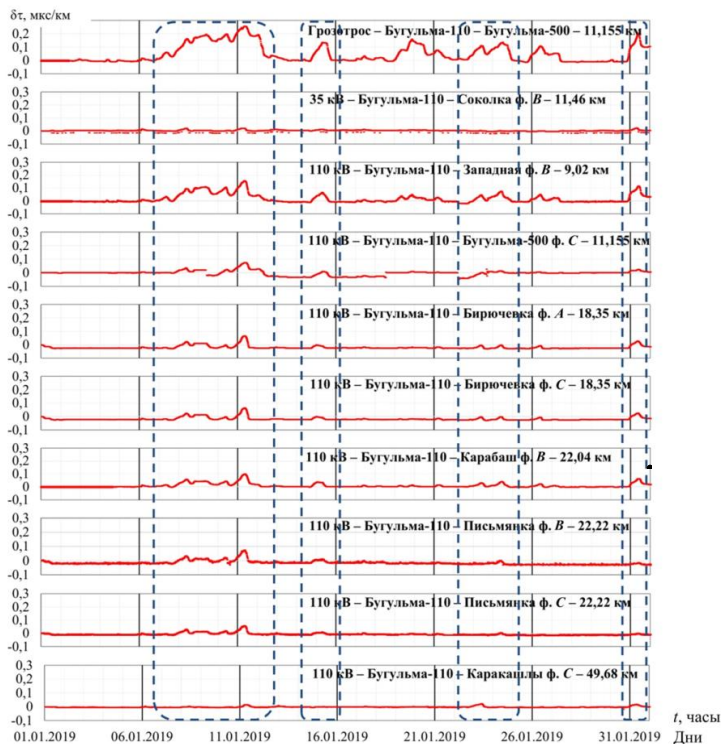


Рис. 1. Регистрации суточных изменений погонных запаздываний δt на десяти ЛЭП, отходящих от подстанции «Бугульма-110», в течение месяца с 1 по 31 января 2019 г. (периоды появления гололедных отложений обозначены штриховыми овалами)

При этом способе контролируется состояние проводов в рабочем, ремонтном и аварийном режимах, регистрируется динамика гололедных отложений, определяется очередность их плавки в зависимости от степени аварийной угрозы отложений и контролируется процесс плавки с недопущением пережога проводов.

Способ №2 (рис. 2). Визуализация результатов зондирования в табличном виде определяет количественную оценку параметров гололедных отложений на данный момент времени.

Секция 1

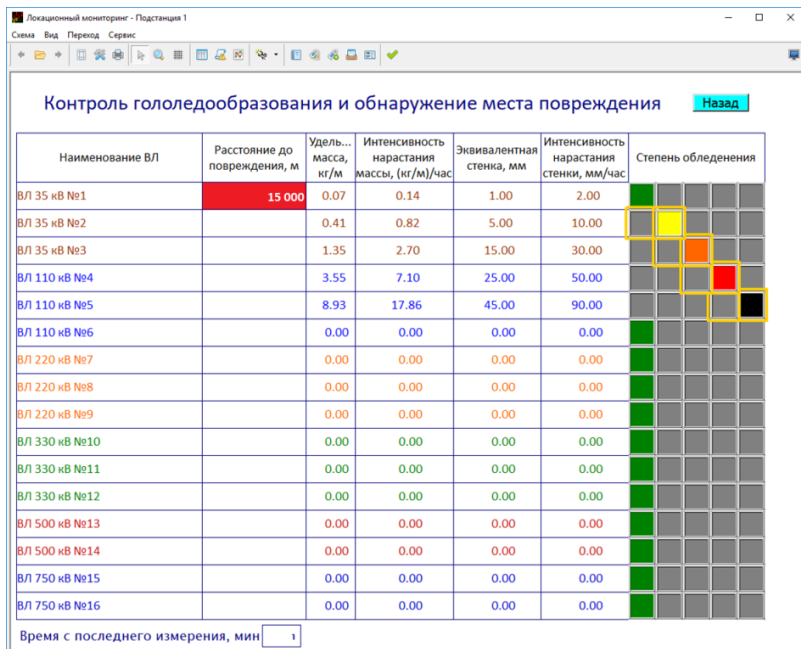


Рис. 2. Табличная визуализация результатов локационного мониторинга проводов ЛЭП на экране монитора диспетчерского пункта подстанции за определенные моменты времени

Способ №3 (рис. 3). Экспресс-контроль мониторинга проводов ЛЭП осуществляется с использованием их мнемосхемы и с определением на ней расстояний до места повреждений с указанием их вида. Качественная цветовая визуализация характеризует распределение массы гололедных отложений по длине контролируемых линий.

За истекшие 27 лет выполнены теоретические и экспериментальные исследования особенностей многоканального локационного зондирования ЛЭП. Разработаны технологии оперативного локационного определения места повреждения проводов ЛЭП с указанием расстояния до них при обрывах и при всех видах их замыканий. Созданы технологии, контролирующие появление на проводах ЛЭП гололедных отложений и оценивающие их массу как причину возможной аварии ЛЭП с предупреждающим сигналом диспетчеру.

Секция 1

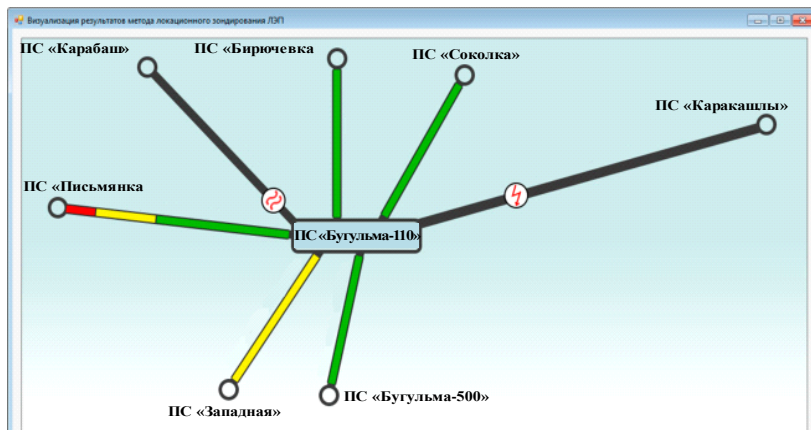


Рис 3. Оперативная визуализация результатов локационного мониторинга на экране монитора диспетчерского пункта подстанции «Бугульма-110»(Татарстан) с использованием мнемосхемы отходящих ЛЭП

По результатам локационных исследований опубликовано 10 монографий, более 450 статей и докладов в российских и зарубежных изданиях в совокупности с патентами на изобретения и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Результаты исследований, разработанные технологии и аппаратные комплексы подробно описаны в монографии «Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи» (автор Р.Г. Минуллин), объемом 440 страниц, изданной в 2022 г [1].

Новизна и уникальность технологии локационного мониторинга ЛЭП подтверждаются наличием его правовой охраны в виде более 45 патентов на изобретения и полезные модели, а также государственных свидетельств о регистрации программ для ЭВМ (патентоладельцем является КГЭУ).

Два варианта локационных комплексов имеют промышленные исполнения в виде измерительных опытных образцов с соответствующим испытательным стендом и сопровождающей конструкторской документацией. Комплексы уникальны и подготовлены при техническом участии специалистов ОАО «НПО

«Радиоэлектроника» им. В. И. Шимко» (г. Казань) и ООО «Промэнерго» (г. Каменск-Уральский), как промышленных партнеров КГЭУ, для промышленного тиражирования с целью оснащения подстанций России, а также подстанций ближнего зарубежья.

Локационные исследования по мониторингу ЛЭП и аппаратные разработки уникальны и не имеют прототипов в мировой практике согласно информационному поиску глубиной в 50 лет.

Выводы

В настоящее время состояние проводов воздушных ЛЭП контролируется с помощью многочисленных измерительных методов и средств, которые не всегда надежны и не всегда дают достоверные результаты.

Единым программно-аппаратным комплексом реализуются следующие технологические возможности локационного метода мониторинга ЛЭП:

- 1) обнаружение обрывов и коротких замыканий проводов ЛЭП;
- 2) контроль обледенения проводов;
- 3) контроль плавки гололедных отложений на проводах;
- 4) блокирование срабатывания автомата повторного включения при наличии в линии устойчивого металлического замыкания проводов;
- 5) контроль температуры и провисания проводов;
- 6) панорамный визуальный контроль работоспособности отходящих от подстанции линий электропередачи;
- 7) контроль конфигурации линий электропередачи;
- 8) обнаружение попыток хищения проводов ЛЭП;
- 9) контроль частотной загрузки системами технологической связи (телемеханика, релейная защита, противоаварийная автоматика) и помеховой обстановки высокочастотных трактов ЛЭП;
- 10) архивирование измеренных данных по повреждениям и гололеду на проводах контролируемых ЛЭП, их доступность для повторного анализа с передачей результатов по заданным адресам.

Выполнение проекта позволит оснастить подстанции России и подстанции ближнего зарубежья надежной диагностической аппаратурой в виде интеллектуальной локационной систе-

мы мониторинга ЛЭП, повышающей бесперебойность их функционирования в условиях эффективного энерго-ресурсосбережения. В итоге проблема текущего мониторинга воздушных ЛЭП 35–330 кВ в России и в ближнем зарубежье будет решена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минуллин, Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи / Р.Г. Минуллин. – Казань: КГЭУ, 2022. – 439 с.

2. Минуллин, Р.Г. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием / Р.Г. Минуллин, Д.Ф. Губаев. – Казань: КГЭУ, 2010. – 208 с.

3. Касимов, В.А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/ Касимов Василь Амирович; КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. – Казань, 2019. – 395 с.

4. Минуллин, Р.Г. Программно-аппаратные комплексы локационного мониторинга воздушных линий электропередачи / Р.Г. Минуллин, В.А. Касимов, А.С. Минкин, Ю.В. Писковацкий, Т.К. Филимонова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2022. С. 271–274.

5. Минуллин, Р.Г. Локационный мониторинг воздушных линий электропередачи с обнаружением гололедных отложений и визуализацией результатов зондирования. Ч.2./ Р.Г. Минуллин, И.Г. Ахметова, В.А. Касимов, А.А. Пиунов // Электрические станции. – 2022. – № 12. – С. 10–19.

Авторы:

Минуллин Ренат Гизатулович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий НИЛ, ФГБОУ ВО «КГЭУ». Радиотехнический факультет Казанского авиационного института в 1959 году. В 1989 году Авиационная радиолокационная станция. E-mail: minullin@mail.ru.

Ахметова Ирина Гареевна, доктор технических наук, доцент, проректор по развитию и инновациям, ФГБОУ ВО «КГЭУ». Теплоэнергетический факультет Казанского государственного энергетического университета в 2002 году. В 2018 году Система комплексной оценки и

повышения эффективности централизованного теплоснабжения промышленных предприятий. E-mail: irina_akhmetova@mail.ru.

Касимов Василь Амирович, доктор технических наук, доцент кафедры РЗА, ФГБОУ ВО «КГЭУ». Институт физики Казанского федерального университета в 2011 году. В 2020 году. Локационный мониторинг гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи. E-mail: vasilkasimov@yandex.ru.

Минкин Ахметгарей Султанович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры РЗА, ФГБОУ ВО «КГЭУ». Физический факультет Казанского государственного университета в 1979 году. В 1988 году, Физика ионосферы. E-mail: cntnur_mn@mail.ru.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Старостина Я.К., Тимофеев Д.Н., ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** В статье приведены основные принципы и подходы к созданию комплексных систем безопасности объектов. Рассмотрен пример приёмно-контрольного прибора, позволяющего построить комплексную систему безопасности (КСБ) на малом объекте, выполненного на базе отечественного контроллера Борей.*

***Ключевые слова:** система безопасности, пожарная сигнализация, система контроля доступа, видеонаблюдение.*

В современном мире безопасность стала одной из важнейших проблем, как для государств, так и для организаций и частных лиц. Комплексные системы безопасности представляют собой интегрированный набор мер, процедур, технических решений и управляющих механизмов, предназначенных для обеспечения безопасности в широком спектре сфер деятельности. Для них можно сформулировать следующие принципы:

1. Целостность и сбалансированность: комплексная система безопасности должна быть разработана с учетом всех взаимосвязанных аспектов и угроз, представленных в конкретной ситуации. Принцип целостности подразумевает учет и интеграцию всех составляющих системы, включая физическую, информаци-

онную и организационную безопасность. Также важно обеспечить сбалансированность между различными мерами безопасности, чтобы минимизировать риски и оптимизировать затраты.

2. Управление рисками: основной задачей комплексной системы безопасности является управление рисками и минимизация воздействия потенциальных угроз. Для достижения этих целей необходимо провести комплексный анализ угроз и уязвимостей, определить уровень риска и разработать соответствующие меры по его управлению. Ключевыми принципами этого процесса являются идентификация угроз, оценка рисков, разработка мер безопасности, проверка и аудит безопасности.

3. Интеграция технических и организационных решений: комплексная система безопасности должна сочетать в себе как технические, так и организационные меры. Технические решения включают в себя использование современных технологий, видеонаблюдение, контроль доступа и другие технические системы. Организационные меры включают управление персоналом, проведение тренировок и обучения, разработку политики безопасности и процедур.

4. Непрерывное обновление и совершенствование: технологии и угрозы постоянно развиваются, поэтому комплексная система безопасности должна быть гибкой и адаптивной. Важно проводить систематический анализ действующей системы и внедрять современные решения и подходы, чтобы эффективно бороться с новыми угрозами и максимально улучшить безопасность [1].

Алгоритм проектирования подразумевает поэтапное объединение систем (рис. 1).

В первую очередь объединяются системы охранной и тревожной сигнализации ввиду их конструктивной схожести. Вторым этапом интегрируется автоматическая пожарная сигнализация и система контроля и управления доступом для обеспечения соответствия комплексной системы безопасности действующему законодательству (СП484 и т.д.) Третьим этапом интегрируется система видеонаблюдения с прочими, в зависимости от требуемого результата. В проектах систем видеонаблюдения может работать в паре с пожарной сигнализацией (ПС) (распознавание дыма и пламени), объектное слежение (ОС) (контроль

Секция 1

периметра, детекция забытых предметов), система контроля и управления доступом (СКУД) (фотоидентификация) [2].



Рис. 1. Алгоритм проектирования комплексной системы безопасности

Пример приёмно-контрольного прибора, позволяющего построить комплексную систему безопасности (КСБ) на малом объекте, выполненного на базе отечественного контроллера Борей, представлен на рис. 2.

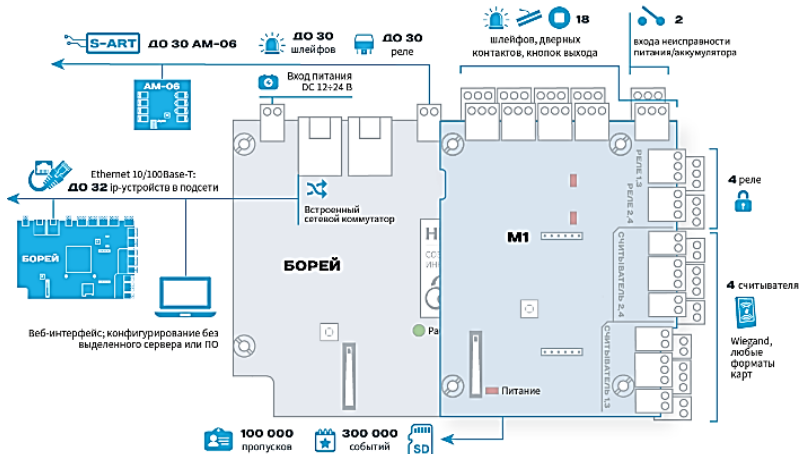


Рис. 2. Пример приёмно-контрольного прибора

При дополнении его внешней системой видеонаблюдения, возможно использовать ОС, СКУД, ПС с использованием нейросетей. Для более крупных объектов интеграция происходит исключительно на программном уровне (рис. 3).

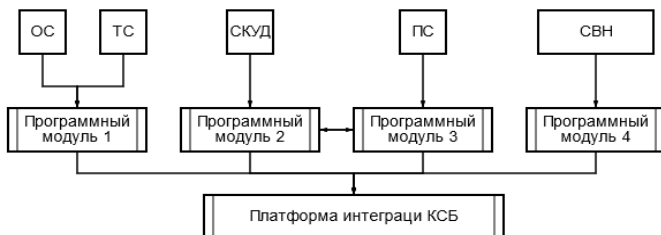


Рис. 3. Структурная схема интегрированной платформы КСБ

Выводы

Основные принципы проектирования комплексных систем безопасности включают целостность, сбалансированность, управление рисками, интеграцию технических и организационных решений и постоянное обновление.

Правильное применение этих принципов позволяет создать эффективную систему безопасности, способную предотвратить потенциальные угрозы и минимизировать риски для государства, организации или индивидуального лица.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Офицеров А.И., Басов О.О., Бачурин С.С.* Концептуальные основы обеспечения комплексной безопасности критически важных объектов. – Экономика. Информатика. 47 (1): 2020. С.154–163.
2. *Ворона, В.А.* Комплексные (интегрированные) системы обеспечения безопасности / В.А. Ворона, В.А. Тихонов. – Москва: Гор. линия-Телеком, 2013. – 160 с.

Авторы:

Старостина Ярослава Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и АПУ», энергетического факультета, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». Окончила энергетический факультет, ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» в 2013 году. В 2020 году защитила кандидатскую диссертацию по специальности

05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы». E-mail: yaroslava.starostina@bk.ru.

Тимофеев Дмитрий Николаевич, студент магистратуры энергетического факультета, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». E-mail: Timofeev.mail.forair@gmail.com.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ОТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ С РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Минкин А.С., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Исследуются изменения механического напряжения в проводах высоковольтных линий электропередачи в зависимости от толщины стенки гололедно-изморозевых отложений с различными значениями плотности без учета ветровых нагрузок и при их наличии.*

***Ключевые слова:** механическое напряжение, высоковольтные линии электропередачи, гололед, гололедно-изморозевые отложения.*

Повреждения на воздушных линиях электропередачи из-за образования гололедно-изморозевых отложений на проводах являются серьезными и трудно устранимыми. Такие аварии имеют массовый характер и приносят большой ущерб поставщикам и потребителям электрической энергии. Согласно данным об аварийных отключениях на объектах энергетики, доля аварий по причине гололедообразования составляет порядка 20% [1]. Мониторинг состояния линий электропередачи с учетом погодных условий позволяет своевременно предотвращать такие аварии [1, 2].

В данной работе решением уравнения состояния провода в пролете [3, 4], найдены значения механического напряжения провода от толщины стенки гололедных отложений с плотностями $0,3\text{г/см}^3$ (изморозь), $0,6\text{г/см}^3$ (гололед) и $0,9\text{г/см}^3$ (гололед) при отсутствии ветра (рис.1) для воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ с длиной пролета 220 м, маркой провода АС–120/19, для которой механическое напряжение разрыва

Секция 1

(максимальное механическое напряжение) $\sigma_{\max}=30,43 \text{ даН/мм}^2$,
удельные нагрузка собственного веса провода $\gamma_0=3,45 \text{ кГ/м мм}^2$.

Из рис. 1 видно, что чем меньше плотность гололедно-изморозевых отложений, тем при больших значениях толщины стенок отложения достигается максимальное значение механического напряжения. В таблице приведены допустимые значения толщин стенок гололеда и 60-ти процентные уровни от этих значений толщин стенки для рассматриваемой линии.

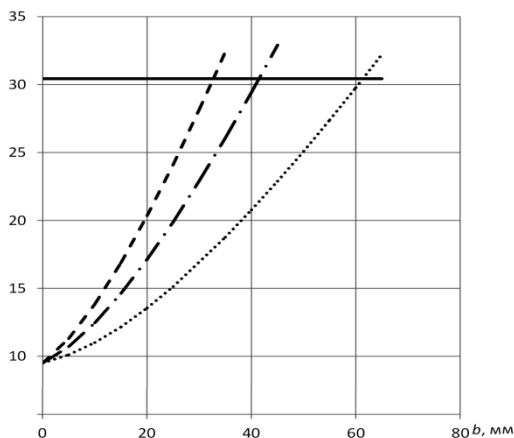


Рис. 1. Зависимость механического напряжения провода от толщины стенки гололедно-изморозевых отложений для различных значений его плотности (сплошная линия – максимальное значение механического напряжения провода АС-120/19, штриховая – $\rho=0,9 \text{ г/см}^3$, штрих-пунктирная – $\rho=0,6 \text{ г/см}^3$, пунктирная – $\rho=0,3 \text{ г/см}^3$).

Таблица

Допустимые значения толщин стенок гололеда

$\rho, \text{ г/см}^3$	0,3	0,6	0,9
$b_{\max}, \text{ мм}$	61,5	41,5	32,7
60% $b_{\max}, \text{ мм}$	36,9	24,9	19,6

Видно, что толщины стенок изморозевых отложений с плотностями $0,3 \text{ г/см}^3$ и гололедных отложений с плотностями $0,9 \text{ г/см}^3$, при которых достигается максимально значение механического напряжения провода, отличается почти в два раза ($61,5 \text{ мм}$ и $32,7 \text{ мм}$).

Поэтому для определения реального состояния воздушной линии электропередачи при гололедообразовании на проводах необходимо контролировать не только изменение толщины стенки гололедно-изморозевых отложений, но и определять их плотность, которая для различных видов гололеда может различаться в разы. Эту важную задачу мониторинга состояния линии электропередачи позволяет решить метод локационного зондирования [1, 5], который основан на измерениях значений затухания и запаздывания отраженных импульсных сигналов, которые зависят от плотности изморозево-гололедных отложений и их геометрических размеров. В [2] теоретически и результатами выполненных измерений показано, что изменения затухания $\Delta\alpha$ и запаздывания Δt локационных сигналов по ЛЭП зависят от конструктивных параметров ЛЭП (радиуса проводов r , расположения и расщепления фазных проводов, схемы организации высокочастотного тракта и др.), от частоты локационного сигнала f и от параметров гололедно-изморозевых отложений (толщины стенки b , плотности ρ , температуры θ , протяженности l). В частности, теоретически получена зависимость комплексной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от плотности гололедно-изморозевых отложений. По экспериментальным данным измерений, проведенных локационным комплексом, получены величины стенки гололедно-изморозевых отложений и их плотности, которые могут вызвать аварии на воздушных линиях электропередачи.

К гололедной нагрузке на провода электропередачи может добавляться ветровая нагрузка [6, 7], которая при больших значениях перпендикулярной к линии составляющей скорости ветра, может оказаться больше гололедной. На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов механического напряжения провода от перпендикулярной к линии электропередачи составляющей скорости ветра при различных значениях толщины стенки гололедно-изморозевых отложений с плотностями $0,3 \text{ г/см}^3$ (изморозь) и $0,9 \text{ г/см}^3$ (гололед) соответственно.

Из сравнения рис. 2 и 3 видно, для изморози с плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$ влияние ветра на механическое напряжение провода оказывается сильнее.

Секция 1

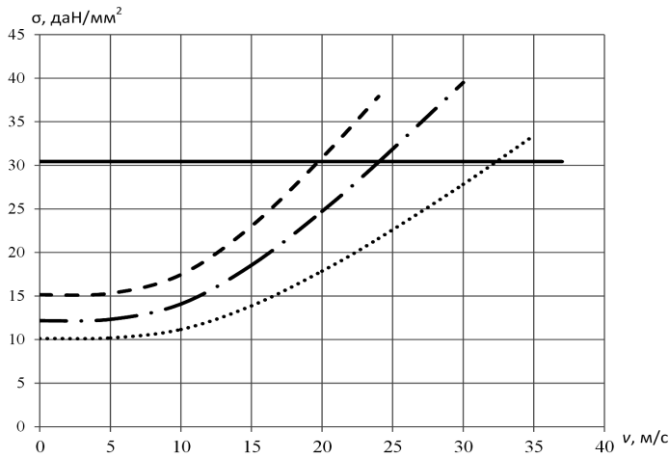


Рис. 2. Зависимость механического напряжения провода от скорости ветра для различных значений толщины стенки изморози плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$ (сплошная линия – максимальное значение механического напряжения провода, штриховая – $b = 25$ мм, штрих-пунктирная – $b = 15$ мм, пунктирная – $b = 5$ мм).

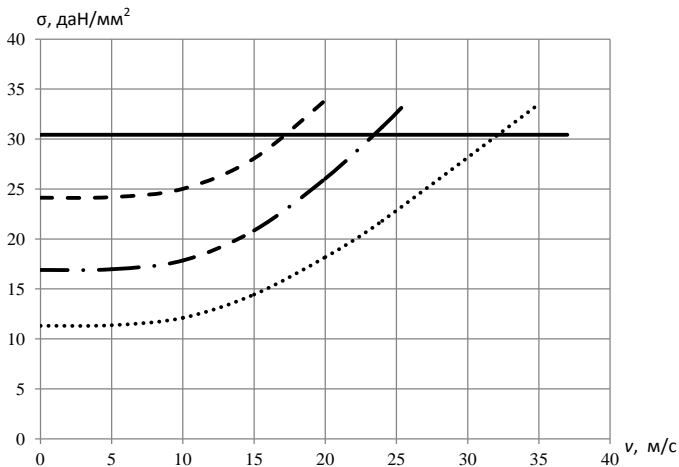


Рис. 3. Зависимость механического напряжения провода от скорости ветра для различных значений толщины стенки гололеда плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$ (сплошная линия – максимальное значение механического напряжения провода, штриховая – $b = 25$ мм, штрих-пунктирная – $b = 15$ мм, пунктирная – $b = 5$ мм)

При прогнозировании механического воздействия гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линиях электропередачи, которые могут вызвать аварии, необходимо учитывать и влияние ветровых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минуллин, Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи м / Р.Г. Минуллин. – Казань: КГЭУ, 2022. – 439 с.

2. Касимов, В.А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Касимов Василь Амирович; КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. – Казань, 2019. – 395 с.

3. Минуллин, Р.Г. Анализ допустимых значений толщины стенки гололеда на проводах высоковольтных линий электропередачи / Р.Г. Минуллин, А.С. Минкин, Э.Ю. Абдуллазянов, В.А. Касимов // Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов XI научно-го семинара по тематике «Электроснабжение» (25-26 сентября 2018 г., Новочеркасск). – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. – С. 160–163.

4. Проектирование механической части ВЛ - расчет сталеалюминиевого провода на прочность [Электронный ресурс] <https://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/proektirovanie-mehanicheskoy-chasti-vl-6.html>.

5. Минуллин, Р.Г. Программно-аппаратные комплексы локационного мониторинга воздушных линий электропередачи / Р.Г. Минуллин., В.А. Касимов, А.С. Минкин, Ю.В. Писковацкий, Т.К. Филимонова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2022. С. 271–274.

6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е издание. – М.: ЭНАС. 2005.

7. Климатические факторы и расчетные нагрузки, действующие на элементы линий электропередач [Электронный ресурс] URL <http://scbist.com/scb/uploaded/kontaktная-set/3.htm>.

Автор

Минкин Ахметгарей Султанович, см. стр. 42.

ПРОВЕРКА ПРОТОКОЛОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СЕТИ SV-ПОДПИСЧИКА МЭК 61850-9-2 В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Рыжов Э.П., Шалимов А.С., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Рассматриваются особенности функциональной проверки SV-подписчика по поддержке протоколов сетевого резервирования с применением программно-технического комплекса моделирования последовательностей тестовых режимов по протоколу МЭК 61850-9-2. Отмечается возможность адаптации рассмотренного сценария испытаний для его выполнения на энергообъектах.*

***Ключевые слова:** тестирование, интеллектуальное электронное устройство, SV-подписчик, МЭК 61850-9-2, МЭК 62439-3, резервирование сети.*

Функционирование интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) релейной защиты и автоматизированной системы управления технологическими процессами высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) с шиной процесса МЭК 61850-9-2 (SV) [1] имеет определённые особенности, обусловленные наличием специальных алгоритмов [2, 3] и обработкой полей данных и качества сетевых пакетов протокола SV. К функционированию элементов системы релейной защиты и автоматики (РЗА) ВАПС также предъявляется требование обеспечения «бесшовного» переключения между SV-потокками при отказе элемента локально-вычислительной сети (сетевого коммутатора) или повреждении оптико-волоконного канала связи между издателем и подписчиком SV. Указанное обеспечивается поддержкой в ИЭУ протоколов параллельного PRP или кольцевого HSR резервирования стандарта МЭК 62439-3 [4].

Для проведения подобных испытаний, совмещающих проверку функционирования алгоритмов РЗА с оценкой устойчивости функционирования ИЭУ при коллизиях в локально-вычислительной сети (ЛВС) ВАПС, требуются соответствующие возможности проверочного комплекса [5]. Публикация SV-потокков должна выполняться с настраиваемым динамическим изменением электрических (амплитуда, фаза, частота и их производные для каналов напряжения и тока) и сетевых параметров

Секция 1

(структуры и содержимого полей сетевых пакетов SV). Для указанного проверочного комплекса, требуется поддержка редакций МЭК 61850-9-2, спецификации МЭК 61850-9-2LE и МЭК 61869-9 с учётом Корпоративного профиля ПАО «Россети». Кроме того, необходима поддержка испытательной установкой временной синхронизации по протоколу точного времени PTPv2.

Согласно программе-методике испытаний АО «НТЦ ФСК ЕЭС» [6], проверка резервирования сети PRP/HSR, обобщённо, осуществляется следующим образом:

1) Выполняется выдача на ИЭУ двух SV-потоков из подсетей PRP/HSR А и В.

2) Осуществляется физическое отсоединение ИЭУ от одной из подсетей ЛВС (А или В) – имитация обрыва.

3) Восстановление отключенной подсети ЛВС.

4) Производится физическое отсоединение ИЭУ от другой подсети ЛВС.

5) Восстановление отключенной подсети ЛВС.

Далее будет рассматриваться сценарий оценки устойчивости поведения ИЭУ при поочерёдной потере двух резервируемых по протоколу PRP SV-потоков с использованием испытательного прибора типа РЕТОМ-61850 и специального программного обеспечения для моделирования динамических искажений данных протокола SV «Генератор SV» (разработчик ООО «НПП «Динамика»).

Настройка примера режима из 5-ти последовательностей (каждая длительностью 1 с) для указанного сценария тестирования поддержки в ИЭУ протокола резервирования PRP приводится на рис. 1. В первую секунду процесса с разных портов испытательной установки производится выдача двух SV-потоков с идентичными параметрами и соответствующими полями данных подсетей PRP А и В. Далее, на 1 с прекращается генерация SV-потока подсети А (рис. 2). На третьей последовательности восстанавливается отключенный SV-поток. На четвёртой последовательности имитируется пропадание SV-потока подсети В (рис. 3). На последней секунде производится восстановление выдачи SV-потока.

Особенностью предлагаемого сценария испытаний, является отсутствие необходимости в физическом (ручная операция) разрыве канала связи (отключении ИЭУ от подсетей ЛВС) для

Секция 1

имитации пропадания SV-потока, что также позволяет выполнять подобные испытания на действующем объекте (ВАПС).

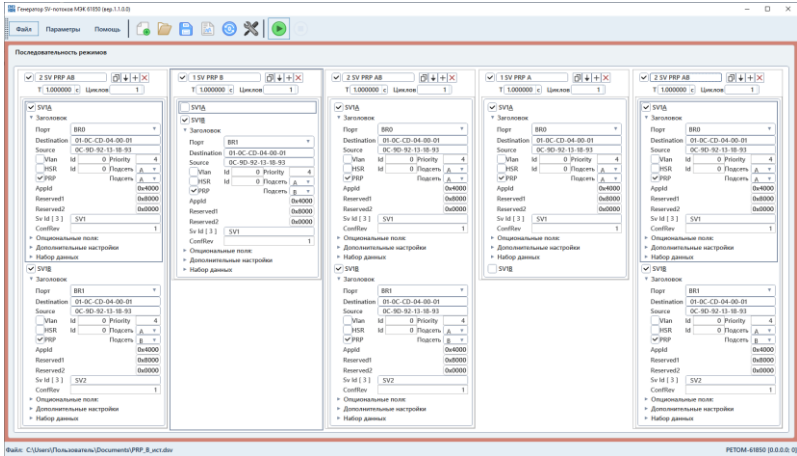


Рис. 1. Сценарий проверки поддержки в ИЭУ РЗА протокола PRP

Рассмотренный сценарий испытаний может быть адаптирован для проверки поведения ИЭУ в аварийном режиме в энергосистеме, при наличии искажений в пакетах одного (или обоих) резервируемых SV-потоков и других ситуаций, определяемых проектом ЛВС ВАПС и опытом эксплуатации. Проверка поддержки резервирования ИЭУ по протоколу HSR осуществляется аналогично, выставлением соответствующей настройки (рис. 1).

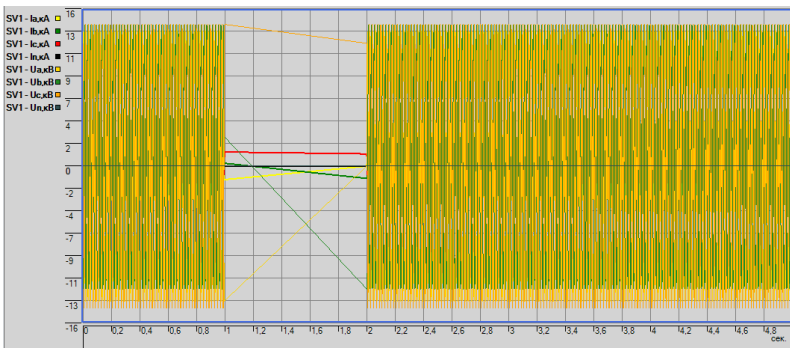


Рис. 2. Осциллограмма электрических параметров процесса с отключением SV-потока подсети PRP А

Секция 1

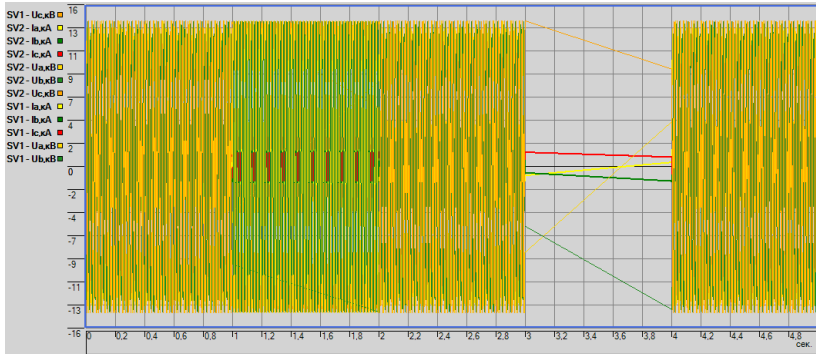


Рис. 3. Оциллограмма электрических параметров процесса с отключением SV-потока подсети PRP В

Выводы

Рассмотренная возможность динамических испытаний SV-подписчика на примере проверки поддержки протоколов сетевого резервирования в ИЭУ РЗА может применяться для полного спектра аттестационных испытаний SV-подписчика – оценки правильности обработки данных в обязательных, опциональных полях, флагах качества и др. и устойчивости ИЭУ при некорректных данных. Также рассмотренный инструмент может применяться для ряда проверок при приёмке ИЭУ РЗА из наладки, при эксплуатационных и послеаварийных проверках.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 61850-9-2. Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Edition 2.1. / International Electrotechnical Commission. – 2020.
2. Шалимов А.С. Тестирование специальных алгоритмов устройств релейной защиты с использованием шины процесса IEC 61850-9-2LE / А.С.Шалимов // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3 (28). С. 39-42.
3. Рыжов Э.П. Тестирование интеллектуальных электронных устройств с поддержкой IEC 61869-9 / Рыжов Э.П., Шалимов А.С. // Релейная защита и автоматизация. 2020. №: 3 (40). С. 30-36.
4. IEC 62439-3:2021. Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol

(PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). - Edition 4.0 / International Electrotechnical Commission. – 2021.

5. *Шалимов А.С.* Опыт периодических испытаний цифровых защит с поддержкой ИЕС 61850-8-1 и ИЕС 61850-9-2 / Шалимов А.С. // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3 (44). С. 100-103.

6. Программа и методики испытаний на соответствие Корпоративному профилю МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС» (SV-подписка). Устройства ЦПС, обрабатывающие выборочные значения (SV). Редакция №1.9 / АО НТЦ ФСК ЕЭС. М. – 2022.

Авторы:

Рыжов Эдуард Петрович, начальник отдела перспективных программных разработок, ООО «НПП «Динамика». В 1995 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова по специальности «Управление и информатика в технических системах». E-mail: ryzhov_eduard@mail.ru.

Шалимов Александр Станиславович, кандидат технических наук, начальник отдела релейной защиты и автоматики, ООО «НПП «Динамика». Окончил электротехнический факультет ЧГУ имени И.Н. Ульянова в 2005 году. В 2022 году защитил в ЧГУ им. И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и технических средств проверки и настройки релейной защиты». E-mail: shalimov-alex@rambler.ru.

СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Пашковский С.Н., Павлов П.С., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные способы выполнения защиты от однофазных замыканий на землю в электрических распределительных сетях с компенсацией ёмкостного тока через дугогасящий реактор. Выделены особенности практического применения каждого способа в отдельности с учетом их реализации в микропроцессорных устройствах релейной защиты. Предложены варианты выполнения защиты, которые не требуют задания индивидуального тока срабатывания в зависимости от ёмкостного тока каждой линии.

При монтаже по принципу действия не требуется соблюдение определенной фазировки цепей тока и напряжения, подводимых к защите.

Ключевые слова: *компенсация ёмкостного тока, защита от однофазного замыкания на землю, высшие гармоники, контрольный ток, активная составляющая тока, дугогасящий реактор, заземляющий резистор.*

Введение

В настоящее время подавляющее большинство кабельных распределительных электрических сетей 6–10 кВ городов и крупных промышленных предприятий имеют большие токи замыкания на землю и поэтому работают в режиме компенсации ёмкостного тока с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор [1].

В компенсированных сетях выявление поврежденного фидера при замыкании на землю затруднено тем, что токи нулевой последовательности промышленной частоты не позволяют сформировать однозначный признак повреждения. Для выявления однофазного замыкания на землю в таких сетях используется замер естественных составляющих токов высших гармоник и сравнение с заданной уставкой срабатывания либо реагирование на составляющие наложенного тока не промышленной частоты, искусственно вводимого в нейтраль сети (например, тока частоты 25 или 100 Гц от специального источника контрольного тока). Известны также защиты на электрических величинах переходного процесса при возникновении ОЗЗ, основанных на контроле знака первой полуволны переходного тока и напряжения нулевой последовательности [2]. Такие защиты для своей работы требуют обязательного соблюдения взаимной фазировки цепей тока и напряжения, что предполагает наличие квалифицированного обслуживающего персонала.

Особенности известных способов выполнения защиты от замыкания на землю

Наиболее распространенными индивидуальными устройствами, которые используют для своей работы естественные высшие гармоники, являются устройства, описанные в [3,4]. Функционирование этих устройств основано на принципе абсолютного замера токов высших гармоник. Известным недостатком у таких устройств является то, что при их практическом

применении является затруднительным выбрать определённый порог уставки срабатывания, так как уровень гармонических составляющих в сети при однофазном замыкании на землю может изменяться в широких пределах [5,6].

Групповые устройства защиты, по сравнению с индивидуальными устройствами, имеют сравнительно более высокую точность определения поврежденного фидера с однофазным замыканием, но в своей практической реализации требуют организации сбора сигналов к одному центральному устройству, функционирующему по принципу относительного замера с определением наибольшего значения из измеренных значений тока высших гармоник, что обуславливает некоторую большую техническую сложность в своей реализации. В разветвленных сетях радиальной структуры устройства относительного замера могут неправильно срабатывать из-за влияния изменения абсолютного уровня токов высших гармоник в сети. Это обусловлено тем, что на подстанциях распределительных сетей, где все линии не повреждены, устройство относительного замера выберет как поврежденную, линию с наибольшим из измеренных значений тока высших гармоник. Для того, чтобы исключить такое ошибочное действие защиты необходимо в устройстве использовать дополнительный признак, позволяющий точно идентифицировать поврежденный фидер, например, сравнение измеренного значения с абсолютной величиной тока высших гармоник на этой подстанции.

Одним из вариантов реализации принципа сравнения может являться сравнение измеренного уровня тока высших гармоник с его модельной величиной, искусственно формируемой в измерительном органе защиты. Подобные предложения ранее предлагались в Ивановском энергетическом университете под руководством д.т.н. В.А. Шуина [7, 8]. С этой целью в устройстве защиты математически формируется модельная величина суммарного уровня тока высших гармоник с учетом доли ёмкости защищаемого фидера по отношению к суммарной ёмкости сети. Обеспечение условий функционирования защиты при возникновении замыкания на защищаемом фидере и внешнем замыкании обусловлено тем, что при внешнем замыкании через место установки защиты протекает ток высших гармоник, пропорциональ-

ный по своей величине собственной ёмкостной проводимости защищаемого фидера. При внутреннем замыкании (ОЗЗ на защищаемом фидере) через защиту протекает суммарный ток высших гармоник всех участков сети, гальванически связанных с местом ОЗЗ, который существенно больше по своей величине, чем ток при внешнем ОЗЗ. Условие срабатывания защиты формируется по факту превышения измеренного значения тока высших гармоник над математически формируемой в устройстве защиты его модельной величиной. Преимуществом такого варианта выполнения защиты является отсутствие необходимости подбора и задания индивидуальной уставки по току срабатывания для каждого защищаемого фидера в явном виде. Рассматриваемый вариант реализации защиты не требует обязательного соблюдения взаимной полярности у цепей тока и напряжения при их подключении к устройству защиты, что существенно упрощает её эксплуатацию.

В последнее время часто высказываются предложения по решению проблемы обеспечения селективной работы защиты от замыканий на землю в распределительных электрических сетях путем изменения режима работы нейтрали, а именно заземление нейтрали через такое достаточно низкое сопротивление, при котором создается большой ток замыкания на землю, позволяющий выполнить простую токовую защиту, реагирующую на абсолютную величину активной составляющей в токе замыкания на землю. Практика показывает, что к такому переводу действия защиты от замыкания на землю готовы не все потребители. Кроме того, при отказе выключателя к низкоомному заземляющему резистору, который, как правило, не рассчитывается на длительное протекание тока ОЗЗ и в целях недопущения его термического повреждения при предельном времени его работы, он автоматически отключается устройством защиты, в результате чего сеть с большим ёмкостным током переходит в режим изолированной нейтрали с возможными известными негативными последствиями. Повторное его включение возможно после остывания до температуры близкой к температуре окружающей среды.

Компромиссным вариантом, по нашему мнению, может являться комбинированное заземление нейтрали. Достоинством комбинированного заземления нейтрали является возможность

отключения заземляющего резистора при отказе защиты без появления существенных проблем. В этом случае сеть переходит в режим работы с компенсацией ёмкостного тока и открывается возможность выполнения в сети селективной защиты от замыканий на землю с использованием повышенной активной составляющей тока, создаваемой дополнительным заземляющим резистором, включенным параллельно ДГР [9, 10]. Такое техническое решение известно довольно давно и широко применяется в зарубежной практике, где устройства защиты реагируют на абсолютную величину тока в токе замыкания на землю. Однако для такого варианта организации защиты требуется большой дополнительный активный ток. Избыточное увеличение активного тока в месте замыкания приводит к ухудшению условий гашения заземляющей дуги, поэтому компромиссным вариантом является применение комбинированного заземления нейтрали, при котором дополнительная активная составляющая тока, обусловленная подключением заземляющих резисторов не превышает десяти процентов от суммарного ёмкостного тока сети. Селективная работа защиты при таком, достаточно небольшом уровне активного тока, обеспечивается за счет применения специальной аналогово-цифровой обработки сигналов тока и напряжения нулевой последовательности при которой защита реагирует на сформированную в измерительном органе абсолютную величину активной составляющей тока. Так как уровень измеряемой активной составляющей тока зависит от угла между векторами тока и напряжения нулевой последовательности, то на функционирование защиты будет оказывать влияние угловая погрешность у трансформаторов тока нулевой последовательности, которая должна быть ограничена некоторым максимально допустимым значением. Необходимые условия для функционирования защиты выполняются при угловой погрешности трансформатора тока нулевой последовательности до 8 градусов в условиях, когда расстройка компенсации может изменяться в пределах от -20% до $+20\%$ [11]. Сохранение данного условия особенно важно для сетей, где дополнительный заземляющий резистор не установлен и естественная активная составляющая тока весьма мала, т.к. обусловлена суммарной

Секция 1

активной проводимостью изоляции фаз сети и активной проводимостью заземляющего дугогасящего реактора.

В своей технической реализации такая защита реагирует на абсолютную величину активной составляющей тока, поэтому определенная взаимная фазировка цепей тока и напряжения нулевой последовательности ей не требуется. Универсальность её также и в том, что активная составляющая не зависит от конфигурации сети, количества находящихся в работе дугогасящих реакторов и их взаимного расположения по подстанциям.

Одним из известных способов выполнения защиты в сетях с компенсацией емкостного тока является измерение уровня низкочастотных гармоник в токе нулевой последовательности при дуговых перемежающихся замыканиях и уровня искусственно наложенного контрольного тока с частотой 25 Гц при устойчивых замыканиях [12]. Достоинствами данного способа выполнения защиты являются относительная стабильность воздействующих величин в различных режимах работы сети, простое и понятное задание единой уставки срабатывания по наложенному на первичную сеть контрольному току для всех отходящих фидеров секции. Для такой защиты не требуется её отстройка от тока небаланса трансформаторов тока и соблюдение определенной фазировки цепей тока и напряжения нулевой последовательности между собой. Границы применимости данного способа ограничены необходимостью установки специального источника контрольного тока и ограничениями по конфигурации сети. Расширением границ возможной применимости данного способа выполнения защиты может являться его реализация в виде замера тока низкочастотных гармонических составляющих по всем контролируемым фидерам секции в одном устройстве с выявлением по относительному принципу наибольшего значения, которое далее сравнивается с измеренным значением низкочастотных гармоник на присоединении к дугогасящему реактору. Логическим условием срабатывания защиты является превышение измеренного значения тока гармоник с частотой ниже промышленной над вычисленным в устройстве защиты нормирующим значением. В качестве нормирующей величины используется доля ёмкости фидера с наибольшим собственным ёмкостным током по отношению к суммарной ёмкости сети.

Защита от замыкания на землю, реализованная по предложенному способу может быть применена в компенсированной сети не оборудованной источником контрольного тока. Для обеспечения действия такой защиты при устойчивых (глухих) замыканиях на землю необходима установка источника контрольного тока частоты 25 Гц или комбинирование её работы с другими защитами, например, с защитой по замеру тока высших гармоник в токе нулевой последовательности или реагирование на активную составляющую тока, обусловленную подключенным к нейтрали резистором.

Выводы

Известные способы выполнения защиты от замыканий на землю в распределительных электрических сетях в зависимости от конкретных условий обладают определенными недостатками. Одними из возможных вариантов, которые могут быть применены во многих случаях, являются применение замера тока высших гармонических составляющих и использование комбинированного заземления нейтрали с реагированием защиты на увеличенную активную составляющую тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. Шестое издание. Дополненное с исправлениями. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2008. – 440 с.
2. *Шуин В.А., Гусенков А.В.* Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
3. А.с. 805463 СССР, МКИЗ Н 02 Н 3/16. Устройство для защиты электроустановки от однофазного замыкания на землю в компенсированной сети / В.В. Кискачи. – № 2678664/24–07. Заявлено 26.10.1978; Оpub. 15.02.1981.
4. *Кискачи В.М.* Устройств сигнализации замыканий на землю / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина, Б.И. Панфилов. – Электрические станции, 1972. – № 4. – С. 69–72.
5. *Кискачи В.М.* Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последовательности / В.М. Кискачи. – Электричество, 1967. – № 4.
6. *Кискачи В.М.* Условия селективной работы сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием высших гармоник

тока нулевой последовательности / В.М. Кискачи. Труды ВНИИЭ. Т.26, – М.: Энергия, 1966.

7. *Добрягина О.А.* Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ: дис...канд. техн. наук: 05.14.02 / Добрягина Ольга Александровна. Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2012. 176 с.

8. *Шадрикова Т.Ю.* Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6-10 кВ: дис...канд. техн. наук: 05.14.02 / Шадрикова Татьяна Юрьевна Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2016. 204 с.

9. *Манилов А.* ОЗЗ в сетях 6-10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали / Манилов А., Барна А. / Новости электротехники. 2012. №6. С.42–44.

10. *Ильиных М.В.* Анализ опыта эксплуатации сети 6 кВ ТЭЦ Кузнецкого металлургического комбината с компенсированной и комбинированно-заземленной нейтралью / Л.И. Сарин., А.И. Ширковец. Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование 6-35 кВ: Труды Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2006. – С. 62–71.

11. *Пашковский С.Н.* Использование активной составляющей тока для обеспечения работы защиты от замыканий на землю в компенсированных сетях с учетом влияния угловых погрешностей трансформаторов тока / В.В. Гречушников. / Сборник докладов VIII Международной молодежной научно-технической конференции Электроэнергетика глазами молодежи, 2017. С. 296–299.

12. *Вайнштейн Р.А.* Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ / С.М. Юдин. Электричество. – 1998. – №7. – С. 26–30.

Авторы:

Пашковский Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий отделом релейной защиты и автоматики среднего напряжения (6-35 кВ) ООО НПП «ЭКРА». В 2006 году окончил Электроэнергетический факультет Оренбургского государственного университета, квалификация «Инженер» по специальности «Электрические станции». В 2010 году в Новосибирском государственном техническом университете по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали». E-mail: pashkovsky_sn@ekra.ru.

Павлов Павел Сергеевич, инженер 3 категории ООО НПП «ЭКРА». В 2019 году окончил факультет Энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, квалификация «Магистр» по специальности «Электроэнергетика и электротехника». E-mail: pavlov_ps@ekra.ru.

ОБУЧЕНИЕ ПЕРСЕПТРОНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ: ПОДГОТОВКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Андреев В.В., Григорьев Э.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Искусственные нейронные сети требуют большой выборки записей сигнала. Разработана программа на Python для выбора структуры персептрона, обучения и получения весовых коэффициентов. Приведено сравнение гистограмм распределения ошибок с результатами аналитической платформы Deductor. Результаты показывают, что аппарат искусственных нейронных сетей может быть использован для обработки сигналов в электротехнике и реализован в микропроцессорном устройстве.*

***Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, переходные процессы, обработка сигналов.*

В электротехнике и электроэнергетике актуальной является задача обработки сигналов в реальном времени [1-3]. Это подразумевает фильтрацию, аппроксимацию сигналов, нахождение уровней нелинейных искажений, момента начала переходных процессов и т.д.[4-6]. Традиционно, для таких задач чаще всего используются фильтры Фурье. Это позволяет достаточно точно осуществлять фильтрацию, выделение характеристик сигнала, однако фильтр Фурье требует временное окно и соответствующую задержку в обработке не менее периода сигнала основной частоты.

Для обработки сигналов может использоваться аппарат искусственных нейронных сетей, в частности, простейшая нейронная сеть – многослойный персептрон [5]. Однако обучение нейронной сети требует значительного количества записей

Секция 1

сигнала при варьировании всех его параметров, что трудно осуществить в экспериментальных условиях. Использование персептрона в микропроцессорной технике можно реализовать, предварительно обучив его на модельных данных, когда можно варьировать все параметры сигнала в широком диапазоне и получать большую обучающую выборку [7]. Для реализации обученной нейронной сети в микропроцессорном устройстве необходимо получение значений всех весовых коэффициентов в каждом нейроне. Количество этих весовых коэффициентов соответствует количеству связей между нейронами в ИНС [4].

В настоящей работе реализована программа для выбора структуры многослойного персептрона, его обучения и получения таблицы весовых коэффициентов для занесения в микропроцессорное устройство.

Программа реализована на языке Python. Использовалась сеть прямого распространения (feedforward). В качестве функции активации была выбрана сигмоида, которая выводит числа в диапазоне (0, 1). Это можно воспринимать как компрессию от $(-\infty, +\infty)$ до (0, 1). С помощью функции `np.random.normal` присваиваются случайные значения весовым коэффициентам и коэффициентам смещения. Для оценки погрешностей использовалась среднеквадратическая ошибка (MSE). Для минимизации потерь использовался алгоритм оптимизации под названием стохастический градиентный спуск (SGD), с помощью которого менялись веса и смещения в нейронах.

$$w_1 \leftarrow w_2 - \eta \frac{\partial L}{\partial w_1},$$

η является константой (оценка обучения), которая контролирует скорость обучения.

Программа позволяет задавать количество слоев в персептроне, количество нейронов в каждом слое, количество эпох обучения. Кроме таблицы результирующих весовых коэффициентов, программа позволяет оценить качество обучения ИНС. Проверка результатов обучения проводилась сравнением гистограмм распределения ошибок по результатам вычислений с результатами, полученными при помощи аналитической платформы Deductor, которая позволяет в автоматическом режиме с элементами визуализации составлять и тестировать нейронные сети.

Блок схема программы показана на рис. 1.

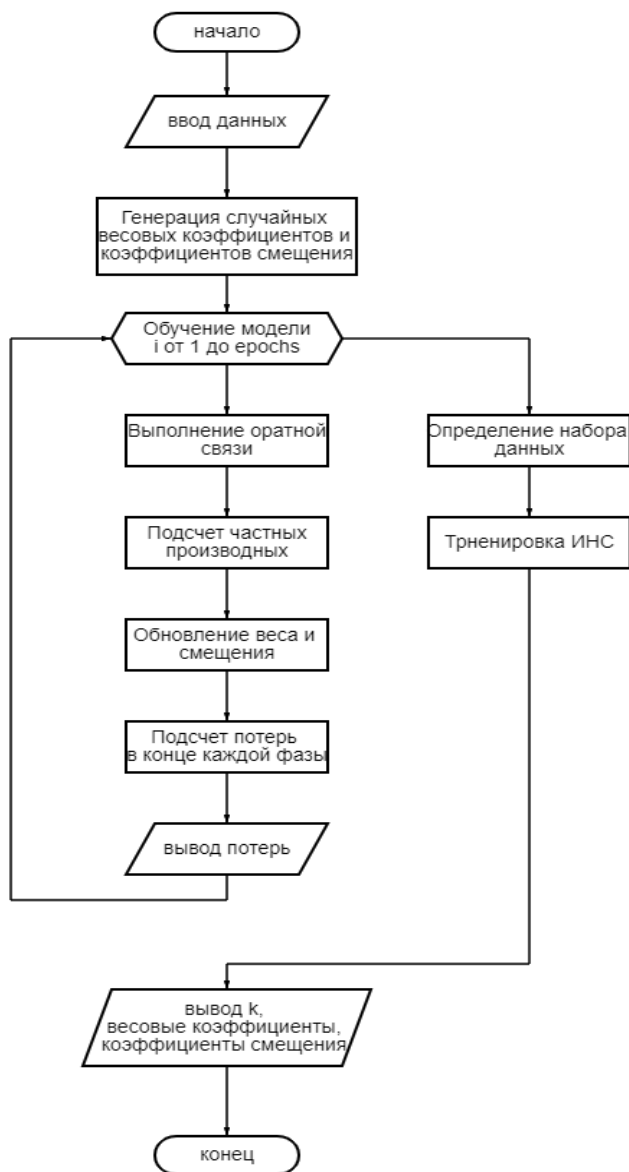


Рис. 1. Блок-схема программы на Python

Секция 1

Приведем пример реализации программы для определения параметров простейшего переходного процесса (апериодического звена 1-ого порядка):

$$g(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

здесь k – коэффициент усиления; T – постоянная времени. При случайных параметрах k , в диапазоне $[0.1; 1]$ и T в диапазоне $[1; 5]$ с выборкой 500.

Структура соответствующего персептрона приведена на рис. 2.

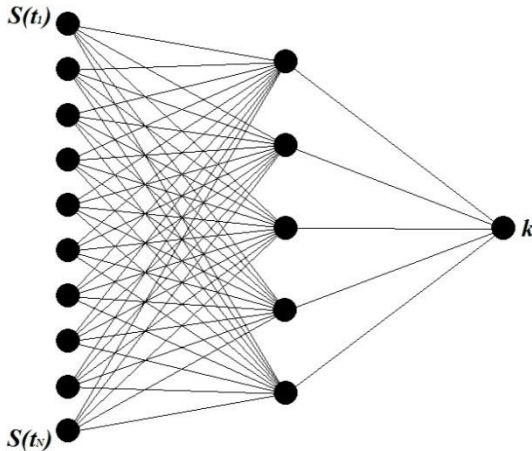


Рис. 2. Структура нейронной сети

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты сравнения качества обучения ИНС, реализованной на языке Python и тестирования соответствующей нейронной сети на отечественной платформе Deductor.

Как видно из рисунков, при определении коэффициента усиления апериодического звена за временное окно соответствующее приблизительно $1/3$ постоянной времени T ошибки при вычислении целевой функции в случае использования реализованной программы и Deductor приблизительно соответствуют друг другу.

Секция 1

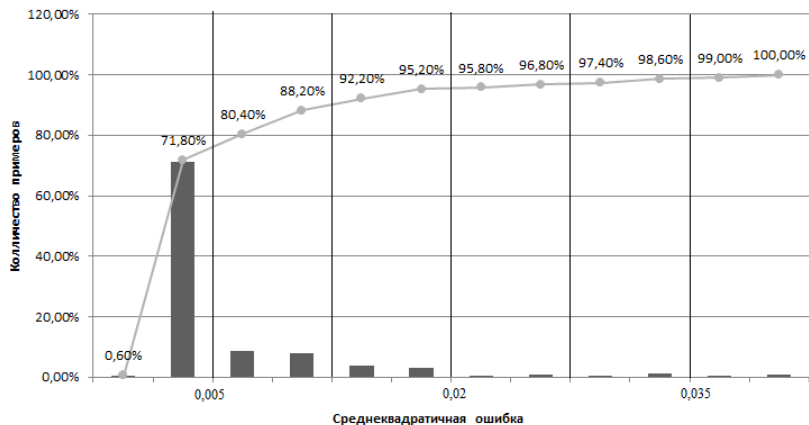


Рис. 3. Гистограммы распределения среднеквадратической ошибки для Python

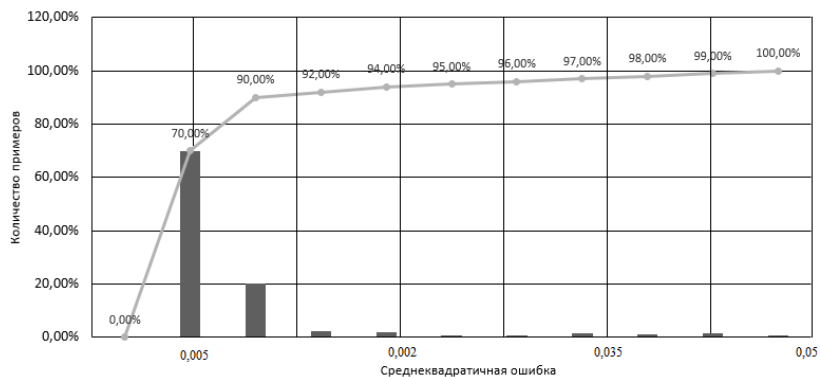


Рис. 4. Гистограммы распределения среднеквадратической ошибки для Deductor

Таким образом, аппарат искусственных нейронных сетей может использоваться для обработки сигналов в электротехнике. После обучения ИНС может быть занесена в микропроцессорное устройство в виде матрицы весовых коэффициентов ИНС. Экспериментальная проверка скорости вычислений в стандартной микропроцессорной технике при помощи отладоч-

ных средств показывает [8], что время вычислений персептрона с несколькими десятками нейронов не превышает 100 мкс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Slavutskiy L.A., Lazareva N.M., Portnov M.S., Slavutskaya E.V.* Neural net without deep learning: signal approximation by multilayer perceptron // 21–23 декабря 2022 года. Vol. 12564, 2023. – DOI 10.1117/12.2669233.

2. *Slavutsky, A.L., Slavutsky L.A., Slavutskaya E.V.* Neural Network for Real-Time Signal Processing: The Nonlinear Distortions Filtering // International Ural Conference on Electrical Power Engineering: Proceedings - 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2021, Magnitogorsk, 24–26 сентября 2021 года. – Magnitogorsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. – P. 84–88. – DOI 10.1109/UralCon52005.2021.9559619.

3. *Андреев О.Н., Славутский А.Л.* Нейросетевой программно-аппаратный контроль сдвига фаз электрических сигналов в реальном времени // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 76–84. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-2-76-84.

4. *Андреев О.Н., Славутский Л.А., Тутаев Г.М., Васильева Л.Н.* Локализация момента начала переходного процесса нейросетевыми программно-аппаратными средствами // Электротехника. – 2023. – № 8. – С. 20–24. – DOI 10.53891/00135860_2023_8_20.

5. *Андреев, В.В., Славутский Л.А., Славутская Е.В.* Обработка сигналов нейросетью прямого распространения: аппроксимация и принятие решений // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 14–22. – DOI 10.47026/1810-1909-2022-1-14-22.

6. *Андреев, О.Н., Ксенофонтов С.И., Славутский А.Л.* Моделирование и нейросетевая обработка сигналов при переходных процессах в электротехнических комплексах // Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева. – Чебоксары: Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева, 2023. – 212 с. – ISBN 978-5-88297-709-1.

7. *Коцеев М.И., Славутский А.Л., Славутский Л.А.* Элементарный персептрон как инструмент анализа переходных процессов // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 84–93. – DOI 10.47026/1810-1909-2020-3-84-93.

8. *Славутский А.Л., Славутский Л.А., Алексеев В.В. [и др.]*. Нейросетевой алгоритм восстановления в реальном времени сигнала промышленной частоты при нелинейных искажениях // Электротехника. – 2021. – № 8. – С. 21–25.

Авторы:

Андреев Вячеслав Владимирович, студент II курса магистратуры факультета радиоэлектроники и автоматики, Чувашский государственный университет. E-mail: vyacheslav-andreev-2000@mail.ru.

Григорьев Эдуард Александрович, студент II курса магистратуры факультета радиоэлектроники и автоматики, Чувашский государственный университет. E-mail: grigorev.edyard2000@mail.ru.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ФОРМИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОГО ТОКА

Иванов В.А., Салмин А.Г., АО «ЧЭАЗ», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В данной работе проводится исследование поведения дифференциальной защиты трансформатора при различных способах формирования тормозных токов. Рассмотрены основные способы формирования тормозных сигналов. На примере модели двухмоточного трансформатора проанализировано поведение защиты при внешних КЗ.*

***Ключевые слова:** релейная защита, дифференциальная защита трансформатора, тормозная характеристика.*

В современных устройствах дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) для увеличения чувствительности и для обеспечения селективности применяются измерительные органы с тормозной характеристикой. Принцип основан на том, что величина тока срабатывания измерительного органа изменяется пропорционально величине сквозного тока [1].

Реализация принципа торможения включает в себя выбор входных сигналов, используемых для формирования тормозного тока I_T и задания тормозной характеристики, представляющую собой зависимость $I_T = f(I_D)$. Тормозная характеристика представлена на рис. 1.

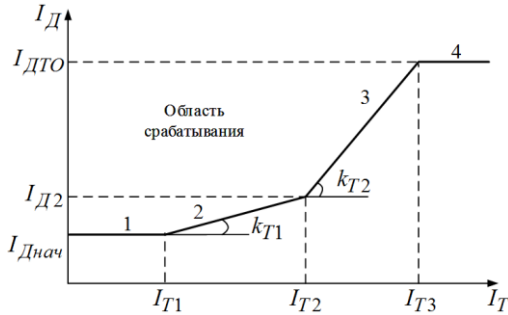


Рис. 1. Тормозная характеристика

Вне зависимости от производителя ДЗТ, дифференциальный ток рассчитывается как векторная сумма первых гармоник токов плеч, получаемых от ТТ. При этом тормозной ток, являющийся функцией токов сторон, может вычисляться у каждого производителя по-разному [2, 3, 4]. В табл. 1 представлены наиболее распространенные способы формирования тормозного тока.

Таблица 1

Способы формирования тормозного тока

Способ №1	Способ №2	Способ №3
$I_T = \max(i_1 , i_2 , \dots, i_n)$	$I_T = \frac{\sum i_n }{2}$	$I_T = \begin{cases} \sqrt{ i'_1 i'_2 } \cos \alpha, \cos \alpha > 0 \\ 0, \cos \alpha \leq 0 \end{cases}$ $\alpha = \arg [i'_1 \cdot (-i'_2)]$

В рамках данной работы рассматривается поведение ДЗТ с торможением, представленной на рис. 1, при различных способах формирования тормозного тока, приведенные в табл. 1.

Исследование поведения ДЗТ

В работе поведение ДЗТ рассматривается на модели двухобмоточного силового трансформатора, приведенной на рис. 2. Для моделирования ТТ используется модель Джилса-Атертона. В табл. 2 приведены значения параметров ТТ.

Секция 1

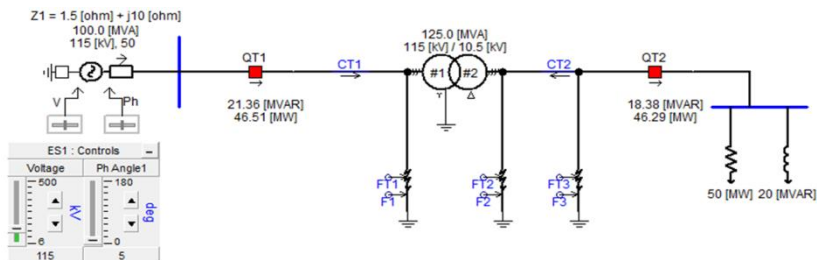


Рис. 2. Модель электрической системы

Таблица 2

Параметры ТТ

Параметр	ТТ1	ТТ2
Номинальный первичный ток, А	300	3000
Номинальный вторичный ток, А	5	5
Номинальная предельная кратность, о.е.	25	20
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	0,8	1,2
Номинальный коэффициент мощности, о.е.	0,8	0,8
Класс точности, о.е.	10P	10P
Поперечное сечение магнитопровода, см ²	19,1	13,5
Средняя длина силовой линии, см	90	52,6
Сопротивление вторичной обмотки, Ом	0,45	1,04
Фактическая нагрузка на вторичные обмотки, Ом	0,37	0,37

Во всех вышеприведенных способах формирования тормозного тока величина этого тока при внешних КЗ одинаково, следовательно, и уставки срабатывания тормозной характеристики будут идентичны. Параметры тормозной характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры тормозной характеристики

Параметр	Значение
$I_{Днач}$, о.е.	0,29
$I_{Т1}$, о.е.	0,87
$k_{Т1}$, о.е.	0,33
$I_{Т2}$, о.е.	2,5
$k_{Т2}$, о.е.	0,42
$I_{ДТО}$, о.е.	6

Для расчета дифференциального и тормозных токов использована модель, собранная в программном комплексе MATLAB, приведенная на рис. 3.

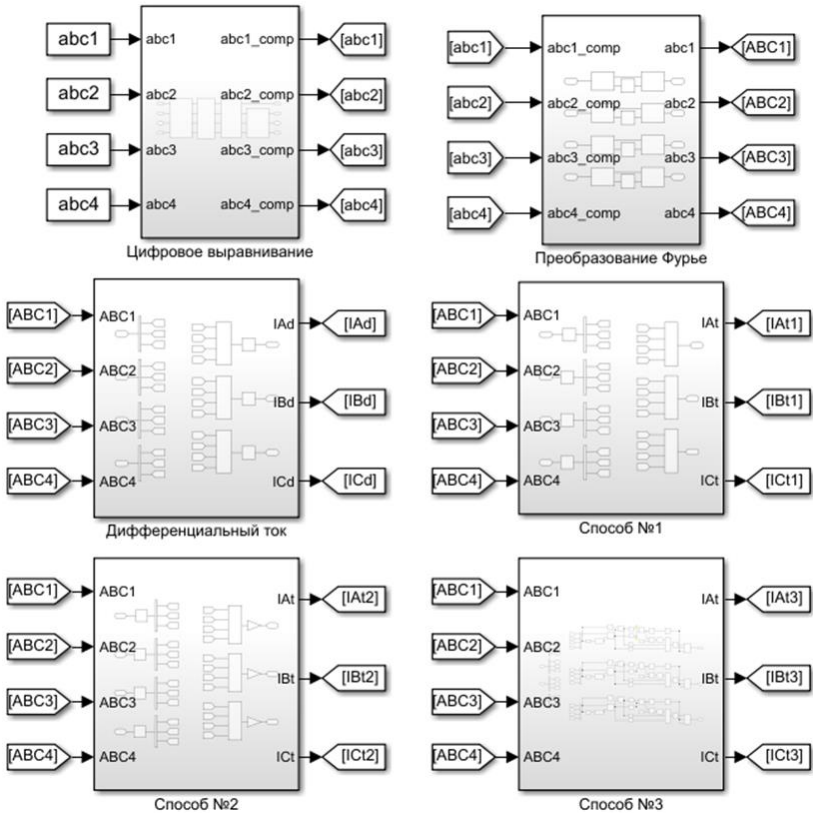


Рис. 3. Модель для расчета дифференциального и тормозных токов

Множественные эксперименты внешнего КЗ с различными уровнями остаточной индукции ТТ показали, что насыщение ТТ может приводить к ложному срабатыванию защиты, независимо от способа формирования тормозного тока. На рис. 4 приведен годограф дифференциального тока в режиме внешнего трехфазного КЗ с остаточной индукцией ТТ равной 0,86 о.е.. На рис. 5–7 приведены осциллограммы вторичных токов в плечах защиты и дифференциальных токов.

Секция 1

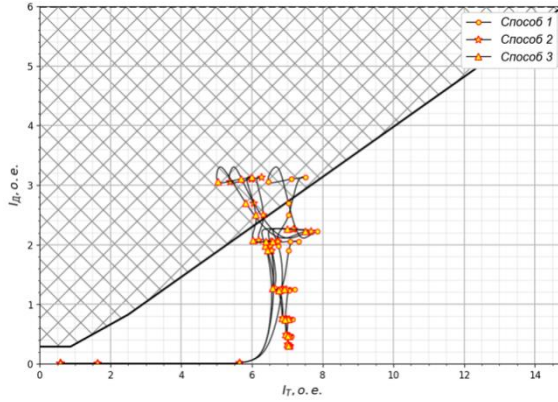


Рис. 4. Годограф дифференциального тока по фазе А при внешнем КЗ

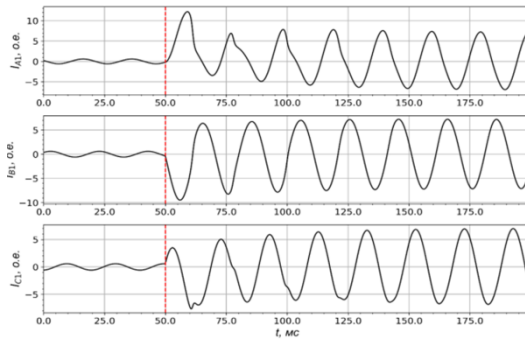


Рис. 5. Осциллограммы вторичных токов со стороны 1

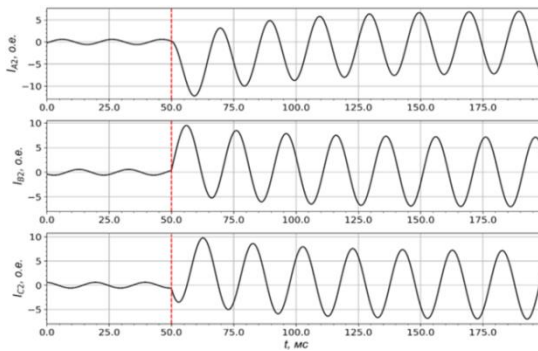


Рис. 6. Осциллограммы вторичных токов со стороны 2

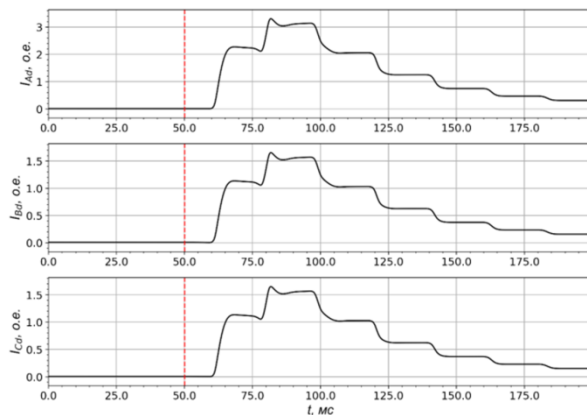


Рис. 7. Осциллограммы дифференциальных токов

Из осциллограмм видно, что во время КЗ происходит насыщение ТТ расположенных на стороне 1, что в свою очередь приводит к возрастанию дифференциального тока. При рассмотрении годографа дифференциального тока по фазе А, представленного на рис. 4, можно заметить, что в ходе насыщения замер дифференциального тока попадает в зону срабатывания, что приводит к ложному срабатыванию защиты.

Выводы

1. На примере модели двухобмоточного трансформатора проанализировано действие дифференциальной защиты трансформатора при внешних КЗ с различными способами формирования тормозного тока

2. Необходимы дополнительные меры для отстройки от неправильных действий дифференциальной защиты с торможением в переходных внешних КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для ву-зов. – 2-е изд. / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ДЗТ4. Руководство по эксплуатации. БКЖИ.656316.004-48.01.

3. Терминал основных и резервных защит двухобмоточного трансформатора БРЕСЛЕР-0107.700. Руководство по эксплуатации. БРСН.656122.700 РЭ. Чебоксары.

4. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА».

Авторы:

Иванов Василий Александрович, инженер-исследователь УТР РЗА АО «ЧЭАЗ», магистрант 1 курса, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: ivanov.vasili.alek@gmail.com.

Салмин Александр Геннадьевич, начальник бюро УТР РЗА АО «ЧЭАЗ», аспирант 1 курса, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: a.salmin@cheaz.ru.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛИ WAVENET: СРАВНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА И HIPERBAND

Бортник Д.В., Орлов А.И., МарГУ, г. Йошкар-Ола, Россия

***Аннотация.** В работе сравниваются методы оптимизации гиперпараметров неросетевой модели для прогнозирования электропотребления с применением архитектуры WaveNet: Байесовская оптимизация и оптимизация Hiperband. Результаты работы показывают, что байесовская оптимизация обеспечивает более высокую точность, но требует больших вычислительных ресурсов, в то время как Hiperband обеспечивает минимальное время обучения сети.*

***Ключевые слова:** нейронная сеть, WaveNet, байесовская оптимизация, Hiperband, временные ряды.*

Введение

В последние десятилетия с ростом сложности моделей машинного обучения вопрос оптимизации гиперпараметров стал ключевым фактором повышения точности результатов. Выбор правильных гиперпараметров модели может существенно влиять на производительность, точность модели, время обучения. В связи с этим существует необходимость применения методов оптимизации, позволяющих быстро и эффективно находить оптимальные наборы гиперпараметров.

Двумя широко распространенными методами оптимизации гиперпараметров, предполагающими применение уникальных алгоритмов, являются байесовская оптимизация и метод Hyperband. В данной статье приводится сравнительный анализ этих двух методов оптимизации на основе экспериментальных данных, рассматривается их эффективность, применимость и влияние на конечные результаты моделирования.

Цель данной работы – обоснование выбора метода определения оптимальных гиперпараметров нейронной сети, построенной по архитектуре WaveNet. Список гиперпараметров включает такие переменные, как количество фильтров (`conv_filters`) на каждом сверточном слое, наличие Dropout слоев для уменьшения переобучения, размер сверточного окна (`kernel_size`) на каждом слое, скорость обучения (`learning_rate`), а также коэффициент регуляризации (`lambda_reg`). Работа направлена не только на повышение точности прогнозов, но и на создание более устойчивой и универсальной модели для предсказания временных рядов, что дополнительно подчеркивает важность поиска оптимальных настроек для повышения производительности модели.

Обзор методов оптимизации гиперпараметров

Байесовская оптимизация основана на построении вероятностной модели зависимости между гиперпараметрами и целевой функцией. Этот метод предполагает поиск оптимальных значений параметров с учетом уже известных данных, в нем сделан акцент на баланс между исследованием новых и использованием известных областей гиперпараметров с хорошими значениями.

Метод Hyperband, напротив, ориентирован на ускоренное обучение сетей. Его концепция "band" позволяет распределять ресурсы между различными конфигурациями гиперпараметров, что делает его особенно эффективным в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Одним из ключевых элементов Hyperband является быстрое исследование параллельных конфигураций для оптимизации времени обучения.

Эти два метода представляют собой различные стратегии оптимизации. Следующий этап включает в себя их сравнительный анализ на основе экспериментальных данных, что поможет лучше понять, в каких сценариях каждый из них проявляет себя наиболее эффективно.

Экспериментальные данные

В рамках данного исследования была произведена аналитика данных по потреблению электроэнергии предприятия, охватывающая трехлетний временной период с периодом дискретизации 1 час. Общее количество записей составило 20 000, исследуемых на основе таких факторов, как время суток, день недели и месяц.

Для анализа использовалось 16 600 часовых записей с целью обучения модели, в то время как оставшиеся 3 400 часов были выделены для тестирования её эффективности. Модель была обучена на основе информации о потреблении электроэнергии за предыдущие 300 часов с целью построения прогноза на следующие 200 часов. Помимо основных данных о потреблении энергии, модель также принимала во внимание наличие праздничных дней, что обогатило контекст прогнозирования.

В исследовании также прогнозные значения, созданные моделью, были сопоставлены с реальными данными по потреблению электроэнергии. Это сравнение позволило оценить точность и эффективность модели в предсказании потребления электроэнергии.

Таблица 1

Искомые параметры

Параметр	Байесовский метод	Hiperband
conv_filters_1	72	112
kernel_size_1	4	2
conv_filters_2	8	40
kernel_size_2	3	3
conv_filters_4	16	16
kernel_size_4	2	2
conv_filters_8	8	16
kernel_size_8	3	2
conv_filters_16	8	8
kernel_size_16	3	3
lambda_reg	0,00028	0,00011
dropout	0,0633	0,00022
learning_rate	0,001	0,001

Поиск оптимальных гиперпараметров проводился на ноутбуке Legion 5 с процессором Ryzen 5 5600H с частотой 3,3 ГГц.

Секция 1

Байесовский метод потребовал 5 часов 43 минут для нахождения наилучших параметров, при этом общее количество эпох составило 140, из которых 40 эпох использовались для общего анализа функции. В случае метода Hyperband процесс занял всего 2 часа 15 минут.

Ниже на рис. 1 и рис. 2 приведены графики работы WaveNet модели на основе полученных параметров Байесовского метода и Hyperband соответственно.

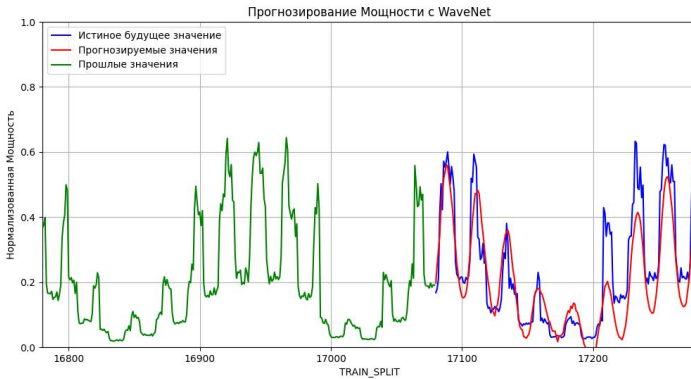


Рис. 1. Предсказание WaveNet оптимизированной с помощью Байесовской оптимизации

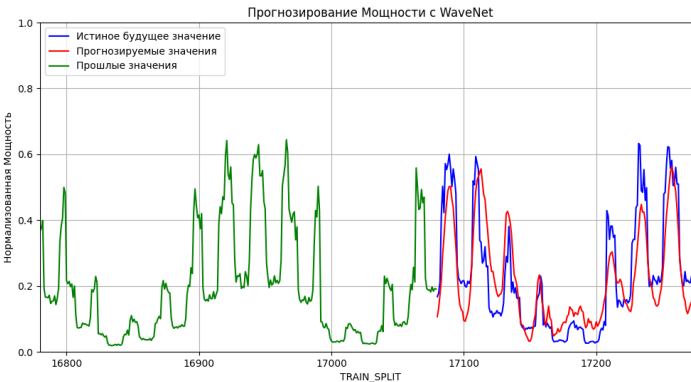


Рис. 2. Предсказание WaveNet оптимизированной с помощью Hyperband оптимизации

Секция 1

Оценка точности прогнозов проводилась с использованием следующих метрик: Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE) и коэффициента детерминации (R^2). Эти метрики позволяют оценить степень соответствия между прогнозируемыми значениями и фактическими данными. Рассматривались средние значения метрик на промежутке прогнозов от 16 600 до 18 000, что обеспечивает оценку точности модели в конкретном временном диапазоне предсказаний, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метрики потерь оптимальных параметров

Метод оптимизации	MSE	MAE	R^2
Байесовская оптимизация	0,020	0,091	0,39
Оптимизация Hyperband	0,021	0,104	0,36

Выводы

На основе табл. 2 можно сделать вывод о превосходстве байесовской оптимизации над оптимизацией Hyperband в предсказании потребления электроэнергии. Байесовская оптимизация продемонстрировала более низкие значения среднеквадратичной ошибки (MSE) 0,020 по сравнению с Hyperband (MSE 0,021), а также меньшие средние абсолютные ошибки (MAE) 0,091 против 0,104. Кроме того, коэффициент детерминации (R^2) для Байесовской оптимизации составил 0,39, в то время как для Hyperband 0,36. Эти результаты подтверждают более высокую точность и эффективность Байесовского метода для прогнозирования временных рядов в данном контексте.

Необходимо отметить, что, несмотря на достижение более высоких показателей точности и эффективности байесовским методом, этот подход обладает существенными вычислительными издержками. Процесс поиска оптимальных гиперпараметров с использованием Байесовской оптимизации занял 5 часов 43 минуты. В сравнении с этим, метод Hyperband продемонстрировал меньший расход времени – 2 часа 15 минут на том же оборудовании.

Таким образом, несмотря на превосходство в точности, байесовская оптимизация требует большего времени вычислений, что ограничивает ее применение. Этот аспект необходимо учитывать

при выборе метода оптимизации гиперпараметров в зависимости от конкретных условий и ресурсных ограничений исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 33–42.

2. Вялкова С.А. Применение метода MSSA к временным рядам электропотребления, температуры воздуха и естественной освещенности/Вялкова С.А., Надтока И.И. // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы XIII Всерос. открытой молод. науч.-практ. конф., г. Казань, 2–4 окт. 2018 г. / отв. ред. Э.Ю. Абдуллазянов, Казанский гос. энерг. ун-т. – Казань: КГЭУ, 2018. – С. 4–9.

3. Надтока И.И. Краткосрочное прогнозирование нагрузки с учетом метеофакторов на основе адаптивной нейро-нечеткой сети / И.И. Надтока, Б.М. Аль Зихери // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: материалы XII международной науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 25 июня 2014 // Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т. (НПИ) имени М.И. Платова-Новочеркасск: 2014. – С.49–55.

4. Торопов А.С., Туликов А.Н. Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 143–151.

5. Vyalkova S. Hybrid Speculation Model of Energy Consumption Based on Multivariate Singular Spectrum Analysis and Neural Fuzzy Network/ Vyalkova S. // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 25–29 March 2019 / IEEE. - Sochi, Russia. IEEE, 2019.

Авторы:

Бортник Денис Валерьевич, аспирант Электроэнергетического факультета ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет». E-mail: bortnik_denis16@mail.ru.

Орлов Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики. Окончил механико-машиностроительный факультет Марийского государственного технического университета в 2008 году, электроэнергетический факультет Марийского государственного университета в 2020 году, защитил диссертацию в Казанском государственном энергетическом университете в 2011 году по специальности «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». E-mail: a.i.orlov@yandex.ru.

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**Охоткин Г.П., Портнов М.С., Чертановский А.Г., Чу-
вашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия**

***Аннотация.** В статье определена актуальность оперативной диагностики износа оборудования электроэнергетических систем, предложен метод дистанционного контроля объектов, находящихся как в зоне видимости, так и за ее пределами с помощью технического зрения, проведен сравнительный анализ оборудования, разработана общая структура системы.*

***Ключевые слова:** электроэнергетика, тепловизор, техническое зрение, диагностика, тепловое состояние, квадрокоптер, микрокомпьютер.*

В современном мире электроэнергетика является базовой отраслью экономики, объединяющая в единую энергосистему комплекс различных видов электростанций, генерирующих электроэнергию, электрических сетей и огромное множество объектов-энергопотребителей. Все это требует особого внимания к текущему состоянию и дальнейшему развитию данной отрасли, что возможно только при тесной взаимосвязи технологических, инновационных и экономических составляющих.

Диагностика износа оборудования и определение аварийного и предаварийного состояния объектов энергосистемы с целью оперативного вмешательства в решение появившейся проблемы, является одной из основных задач обеспечения бесперебойной поставки качественной электроэнергии. Как правило, для оценки состояния электроэнергетических объектов используется комплекс программно-аппаратных средств, который позволяет регистрировать и обрабатывать в режиме реального времени технические параметры оборудования. При этом не всегда имеется возможность устанавливать такие комплексы повсеместно, что ограничивает их использование. Учитывая многообразие и сложность проверяемого оборудования, альтернативой могут выступать интеллектуальные системы анализа больших данных

на основе нейронных сетей или универсальное типовое оборудование совместно с вычислительной машиной [1].

В рамках данной статьи будет рассмотрен один из методов дистанционного контроля электроэнергетических объектов с помощью технического зрения. Структура и состав, а также способ реализации технического зрения зависят, в первую очередь, от выбранных параметров объекта, требующих обнаружения, распознавания и идентификации. В случае мониторинга электросетевого оборудования на предмет физического износа или аварийного режима работы, таким параметром выступает показатель теплового состояния объекта. Своевременное определение перегрева оборудования или отдельных его элементов позволит выполнить ряд мероприятий по выявлению и устранению появившейся проблемы или провести внеплановое профилактическое техническое обслуживание. Таким образом, основу технического зрения для контроля теплового состояния электросетевого оборудования должно составлять устройство тепловидения – тепловизор. Принцип действия тепловизора основан на анализе инфракрасного излучения от различных объектов, что позволяет определить границы объектов с дальнейшей их визуализацией [2].

Большое разнообразие тепловизоров на рынке средств интеллектуального наблюдения усложняет выбор таких устройств. Функционал у всех тепловизоров примерно одинаковый. Тем не менее, именно круг решаемых задач и условия эксплуатации прибора определяют, какими характеристиками он должен обладать. Среди основных характеристик можно выделить угол и дальность обзора, параметры датчика (матрицы) и, в некоторых случаях, размер и вес.

Для дистанционного контроля теплового состояния электроэнергетических объектов, находящихся в зоне видимости, необходимы тепловизоры с определенными параметрами. В частности, температурный диапазон должен быть не менее 650°C , чувствительность – $0,1^{\circ}\text{C}$, точность измерения не ниже 2 %, а также обязательно наличие встроенного экрана, достаточного для наблюдения за термограммой и обеспечения четкого изображения размером не менее 320×240 элементов в полевых условиях. Некоторые характеристики профессиональных

Секция 1

тепловизоров разных производителей, применяемых в электроэнергетической сфере, представлены в таблице.

Таблица

Основные характеристики тепловизоров

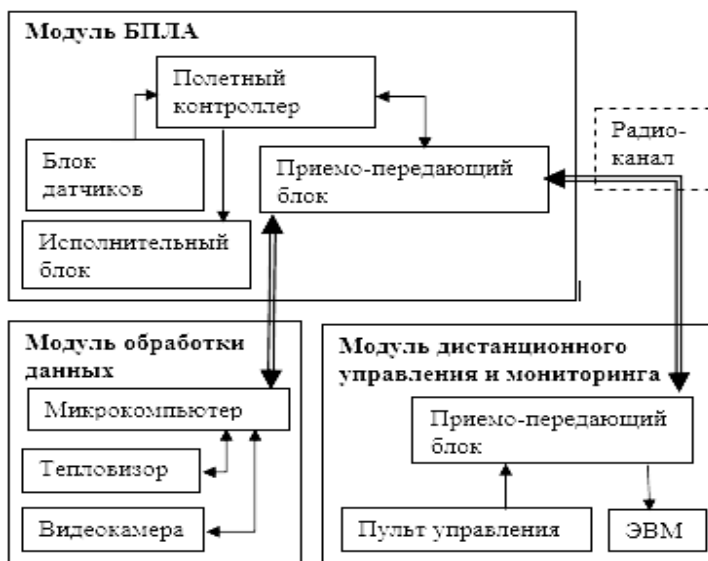
Характеристики	Testo 872	Fluke Ti300	RGK TL-400	НИКМИ CRO G40	Guide PS600
Температурный диапазон измерений, °С	-30/+650	-20/+650	-20/+650	-20/+650	-40/+800
Угол обзора, град.	42 × 30	34 × 24	24,6 × 18,6	19 × 14	24,6 × 18,5
Погрешность измерений, °С	±2	±2 °С	±2	±2	±2
Температурная чувствительность, °С	0,06	≤0,075	≤0,08	≤0,035	≤0,04
Размер изображения, пикс.	320 × 240	320 × 240	384 × 288	480 × 360	640 × 480
Цена, руб.	582 920	418 500	329 990	999 990	1 609 423

Кроме этого, активно ведутся работы по разработке специализированных комбинированных систем для инспекции линий электропередач и решения других задач в сфере энергетики, анализ которых показывает, что стоимость всего комплекта складывается из трех основных модулей: квадрокоптера, высокоточного тепловизора и широкоугольной камеры с оптическим зумом. В итоге цена начинается от 1,5 млн рублей. При этом в большинстве случаев все имеющиеся возможности системы в полной мере не используются, что определяет нецелесообразность покупки комплексного решения. Например, стоимость оборудования DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse H20 и тепловизором Zenmuse XT S составляет 2,5 млн рублей.

Для труднодоступных мест вполне оправдано использование технического зрения, предусматривающего непосредственно тепловизор, систему обработки данных, систему визуализации и робототехническую систему, как например, квадрокоптер или беспилотный летательный аппарат. В этом случае нет необ-

Секция 1

ходимости в применении специализированного тепловизора, поскольку его основное назначение будет заключаться только в регистрации температур поверхности объектов и передаче их для обработки. Основную работу по анализу данных будет выполнять вычислительная машина, в качестве которой, как вариант, подойдет микрокомпьютер. В связи с ограничением полезной нагрузки квадрокоптера на выбор тепловизора и микрокомпьютера существенное влияние окажут их вес и размеры. Еще одной характеристикой, определяющей выбор оборудования, является энергопотребление и энергосбережение для длительного срока службы батареи. Структурная схема такой системы на основе технического зрения представлена на рисунке.



Структурная схема системы технического зрения

Таким образом, систему технического зрения для дистанционной диагностики износа оборудования по тепловому состоянию и инспекции линий электропередач можно компоновать из квадрокоптера со средними характеристиками с установленными на него тепловизионного комплекта, объединяющего тепловизор и видеокамеру с соответствующими характеристиками, и

микрокомпьютера, например, Raspberry Pi 4 или ASUS Tinker Board S. Для визуализации полученных данных достаточно связать микрокомпьютер с планшетом или переносным компьютером. Для передачи данных об объектах можно организовать переносные приемо-передающие станции [3]. Для точности анализа полученных данных необходимо учитывать непреднамеренные электромагнитные помехи [4].

Выводы

Для дистанционного контроля теплового состояния электроэнергетических объектов использование тепловизора в качестве элемента технического зрения оправдано, так как позволяет производить соответствующие измерения без частичного или полного отключения оборудования: силовых электронных элементов, трансформаторов, коммутационных систем, воздушных линий электропередачи и т.д.

Выбор и компоновка оборудования для технического зрения зависит от круга решаемых задач. В электроэнергетической сфере такими задачами являются диагностика износа оборудования по тепловому состоянию и инспекция линий электропередач.

Для решения локальных задач по дистанционному мониторингу электроэнергетического оборудования нецелесообразно использовать готовые комплексные решения по причине их высокой стоимости и избыточного функционала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Речнов А.В. О применении методов машинного обучения / А.В. Речнов, М.С. Портнов, В.П. Филиппов // Высшая школа России и достижение национальных целей развития страны: Материалы XIV Межд. учебно-методической конференции, Чебоксары, 28 октября 2022 года / Под редакцией А.Ю. Александрова, Е.Л. Николаева. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 85–90.

2. Шапиро Л. Компьютерное зрение [Электронный ресурс] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.

3. Чумаров С.Г. Быстрое развертывание сетей связи на основе программно-определяемого радио // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 14-й Все-

Секция 1

рос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 64-66.

4. Чумаров С.Г., Савинов Р.Н. Исследование влияния электромагнитных помех на метрологические характеристики радиоэлектронной продукции // *Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем: мат. IV Межд. науч.-практ. конф.* – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2020. – С. 409–412.

Авторы:

Охоткин Григорий Петрович, доктор технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и автоматики, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 1982 году окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2007 году получил ученую степень доктора технических наук по теме «Развитие теории динамических процессов и разработка быстродействующих полупроводниковых преобразователей для электропривода», специальность 05.09.12 – Силовая электроника. E-mail: elius@list.ru.

Портнов Михаил Семенович, кандидат социологических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 1994 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2004 году получил ученую степень кандидата социологических наук по теме «Социально-экономические основы оптимизации информационной службы в системе потребительской кооперации», специальность 22.00.03 - Экономическая социология и демография. E-mail: maks-lebedeff2013@yandex.ru.

Чертановский Алексей Григорьевич, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 2001 году окончил факультет радиотехники и электроники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: alexgray@mail.ru.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ВОЛНОВОГО ОМП ПО РЕАЛЬНЫМ АВАРИЙНЫМ ОСЦИЛЛОГРАММАМ

Кирюшин М.И., Ермаков К.И., ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В докладе описывается опыт определения места повреждения однофазного замыкания на землю на линии электропередачи 35 кВ с изолированной нейтралью. Анализ результатов позволяет сделать вывод о применимости и преимуществах устройств волнового определения места повреждения.*

***Ключевые слова:** линия электропередачи, определение места повреждения, однофазное замыкание на землю.*

Современные устройства определения места повреждения (ОМП), которые основаны на измерении аварийных напряжений и токов, способны определить все виды повреждений, кроме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Причиной является низкое значение аварийных токов при ОЗЗ, за счет чего линия не отключается, а потребитель продолжает получать электроэнергию.

Но несмотря на это, ОЗЗ не является нормальным режимом работы, и его нужно устранять по следующим причинам:

- опасность поражения электрическим током людей, животных и растений;
- ускорение старения изоляции;
- возможен переход от ОЗЗ к КЗ;
- феррорезонанс отрицательно сказывается на ТН.

Для определения места ОЗЗ могло бы подойти волновое ОМП, основанное на измерении разницы времени пробега электромагнитной волны от точки повреждения к разным концам ЛЭП. Но проблема заключается в распознавании волны.

Дело в том, что при повреждениях в одной и той же точке ЛЭП, волна в наблюдаемом сигнале будет иметь разные характеристики. Амплитуда и крутизна фронта волны зависят от мгновенного значения напряжения и, при определенных условиях, фронт волны трудно распознаваем.

В целях улучшения точности было реализовано два волновых расчета, по току и по напряжению, что дает возможность

Секция 1

выбрать сигнал с наиболее выраженным фронтом. Так же для автоматического определения момента времени аварийной волны реализованы два метода решения задачи: высокочастотный (фильтр Баттерворта) и статистический.

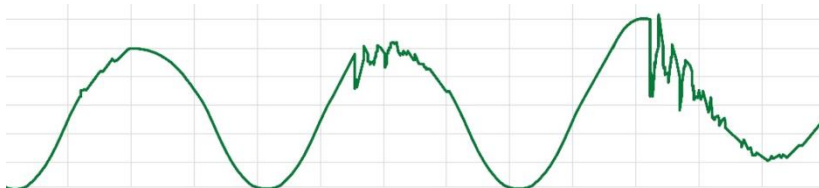


Рис. 1. Форма сигнала в зависимости от мгновенного значения

Для оценки точности методов, в марте 2023 года были проведены испытания ОЗЗ на линии 35 кВ Восточная – Верхний Куранах. Длина линии составляет 18,078 км.

ОЗЗ имитировалось включением выключателя, подключенного одной стороной к линии, другой в заземленной части опоры. Линия при тестах находилась под напряжением.

На рис. 2 приведена ВЧ осциллограмма напряжений и токов поврежденной фазы.

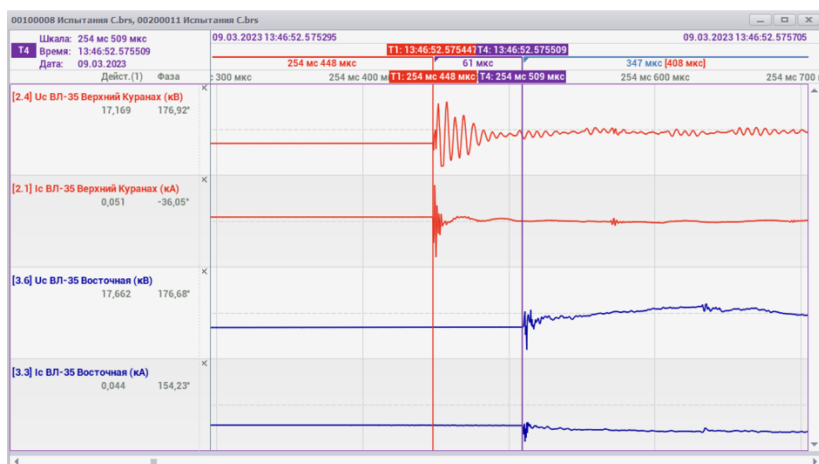


Рис. 2. ВЧ осциллограмма напряжений и токов

Результаты определения моментов времени аварийной волны разными методами и в разных сигналах приведены в таблице.

Результаты определения моментов времени аварийной волны

Метод определения метки времени ава- рийной волны	Погрешность относительно начала волны			
	ПС «Восточная»		ПС «Верхний Кураных»	
	U	I	U	I
Фильтр Баттерворта	2 мкс	0,8 мкс	1,2 мкс	0,8 мкс
Коэффициент эксцесса	2,4 мкс	1,2 мкс	1,6 мкс	1,2 мкс

На рис. 3 показаны графики коэффициента эксцесса и фильтра Баттерворта для волны в токе поврежденной фазы.

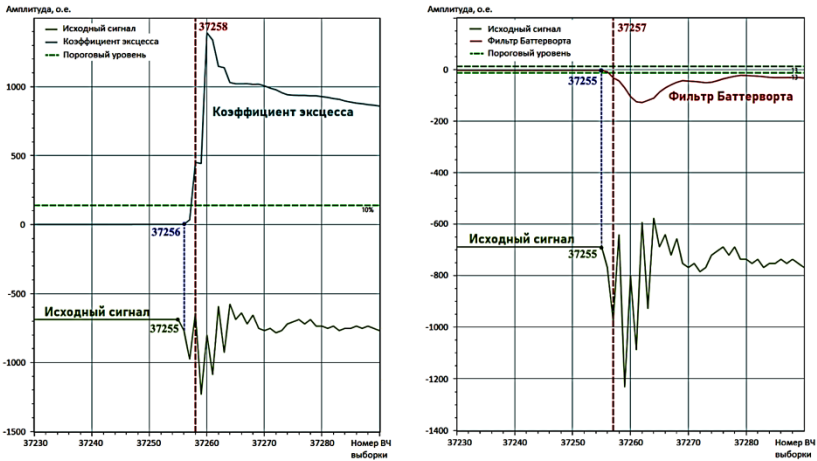


Рис. 3. Графики коэффициента эксцесса и фильтра Баттерворта для волны в токе

На испытаниях оба алгоритма определения моментов времени волны показали себя хорошо, но опыт эксплуатации показывает, что при определенных характеристиках сигнала переходного процесса, каждый из них может иметь преимущества и недостатки.

ВЧ фильтр имеет меньшую задержку, но не может отработать при малом уровне ВЧ составляющих. Что касается коэффициента эксцесса, то его преимущество в том, что он реагирует на любое изменение сигнала. Но это может стать недостатком при наличии в сигнале предаварийного режима помех.

Таким образом, комплекс ОМП с улучшенной точностью позволяет определить все виды повреждений, что достигается за счет двух волновых расчетов – по току и напряжению, позволяя выбрать сигнал с более выраженным фронтом волны. Так же момент времени волны рассчитывается несколькими алгоритмами – с использованием ВЧ фильтра Баттерворта и коэффициента эксцесса. Каждый алгоритм, в зависимости от характеристик сигнала волны, имеет свои преимущества и недостатки. Результаты подтверждены испытаниями на действующей линии, точность автоматического ОМП составила не более 150 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шуин В.А., Гусенков А.В.* Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. Выпуск 11(35). – М.: НТФ «Энергопротресс», «Энергетик», 2001. – 102 с.
2. *Шалыт Г.М.* Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
3. *Булывчев А.В., Ермаков К.И., Козлов В.Н., Михеев К.А., Бойко О.А.* Волновой метод определения мест повреждения на ВЛ 35 кВ. Сравнительный анализ датчиков волны // *Новости электротехники.* – 2020. – № 6 (126). – С. 22–23.
4. *Бойко О.А., Ермаков К.И., Кирюшин М.И.* Разработка микропроцессорного комплекса определения места повреждения при всех видах замыканий на линиях 35 кВ, интегрированного в цифровые активно-адаптивные сети // *Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отраслей 2021 года.* – 2021. – С. 194–196.

Авторы:

Кирюшин Максим Игоревич, инженер сектора ОМП и РАС, ООО «НПП Бреслер». Окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, факультет «Энергетика и электротехника» в 2019 году. E-mail: kiryushin_mi@bresler.ru.

Ермаков Константин Игоревич, кандидат технических наук, заведующий сектором ОМП и РАС, ООО «НПП Бреслер». Окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» в 2009 году. Защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линии электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ» в 2022 году. E-mail: ermakov@bresler.ru.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СЕТЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Никифоров И.К., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация:** Отмечено, что основой электроснабжения в недалеком будущем станут кластеры разнородных по принципу получения электрической энергии электростанции, объединённые в мультиагентные сети. Это потребует кардинального изменения межотраслевых отношений, разработки и внедрения новых информационных принципов управления электроэнергетической структурой.*

***Ключевые слова:** энергетические системы, мультиагентные сети, методы машинного обучения.*

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09 июня 2020 г. (№ 1523-р) утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года». Одной из указанных характеристик стратегии развития является цифровая трансформация и интеллектуализация отраслей топливно-энергетического комплекса.

Общая мировая тенденция – экономика электроэнергетической отрасли начинает отдавать предпочтение малой генерации электроэнергии, подключенной к общей распределительной сети. Этот сдвиг в производстве электроэнергии вызван двумя тенденциями:

1. Проблема загрязнения окружающей среды и климатических изменений породила интерес к новым технологиям выработки электроэнергии. Правительства многих стран субсидируют разработку экологически безвредных методов выработки электроэнергии, включая солнечную энергию, энергию ветра, топливные элементы, силу приливов и тепловую энергии Земли.

2. Стремление к повышению эффективности приводит к использованию малой генерации за счет использования генераторов, работающих на газе. Новые технологии, например, топливные элементы, будут также применяться в общественных зданиях и жилых домах, чтобы производить электричество и обогревать воду.

С практической точки зрения, конфигурацию включения столь разнородных источников энергии интеллектуальной энергоинформационной сети можно описать как многоагентную систему, образованную большим количеством частично независимых интеллектуальных агентов, где искусственная нейронная сеть (ИНС) выполняет функции оценки рисков и согласования интересов. То есть, если подойти с точки зрения общего управления энергетической системы (ЭС), то ИНС – это своего рода контролирующей и согласовывающей надуровень верхнего традиционного уровня АСУ ТП. Тогда, как известно, что основную информацию о системе в целом предоставляет нижний уровень АСУ ТП в виде отдельных приборов (реле) и устройств. Применительно к ЭС в условиях динамической неопределенности и возможности гибкого управления и создания иерархических структур наиболее подходят ИНС для дополнения и расширения верхнего уровня АСУ и нечеткой логики (для различных реле автоматики и управления) на нижнем уровне АСУ [1].

Другими словами, одним из способов преодоления структурно-технологического кризиса в энергетике является построение взаимосвязанных самоорганизующихся интеллектуальных систем, предполагающих мультиагентное управление [2]. При использовании таких систем становится возможным воедино увязать все имеющиеся технологии и концепции и преодолеть ограничения узкоотраслевого подхода. Это даст появление качественно новых эффектов от возникших межотраслевой и энергоинформационной синергий.

Переход к интеллектуальной энергосистеме (ИЭС) предполагает широкое внедрение и развитие на основе концепции Smart Grid, в целом трактуемой как «умная» или «интеллектуальная» сеть (в данном случае энергосистема). В РФ это понятие трактуется как «интеллектуальная энергосистема с активно-адаптивной сетью». «Электроэнергетика будущего становится инфраструктурной клиентоориентированной областью деятельности, которая не только предоставляет потребителю электроэнергию в требуемом месте, необходимого качества и с требуемой надежностью по приемлемой цене, но и фактически принципиально меняет парадигму функционирования и развития ЭС в сторону приоритета требований потребителя» [3].

Структура мультиагентной ЭС

Указанные тенденции развития ЭС показывают, что основой электроснабжения в ближайшие десятилетия станут кластеры разнородных по принципу получения электрической энергии электростанции, объединённые в мультиагентные сети. При этом отметим, что активно-адаптивные и мультиагентные сети – разные по сути своей организации и управления сети [2].

Обобщённая структура мультиагентной сети (рис. 1) включает в себя разнородные по принципу получения электроэнергии электростанции.

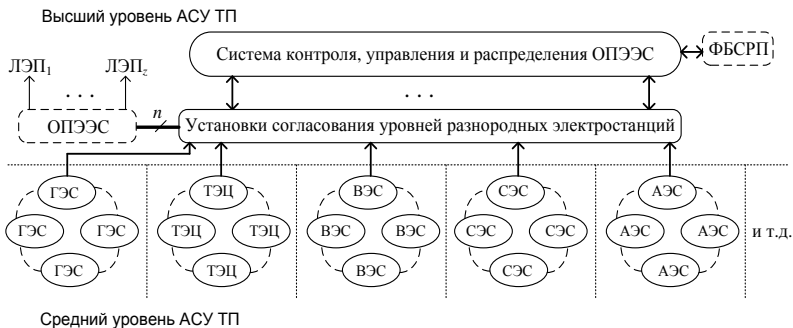


Рис. 1. Обобщенная структура мультиагентной ЭС:

ГЭС – гидроэлектростанции; ТЭЦ – теплоцентрали (тепловые электроэнергетические станции); ВЭС – ветряные электростанции; СЭС – солнечные электростанции; АЭС – атомные электростанции; ОПЭЭС – общепотребительская ЭЭС; ФБСРП – финансово-банковская структура расчетов и платежей (учета продажи и потребления электроэнергии)

Суть подобной мультиагентной ЭС заключается в следующем. Каждая электростанция объединяется с себе подобными (например, солнечные), образуя некий кластер N_i . Другие мини-электростанции (например, ветряки) образуют свой кластер M_j и т.д. Уровни напряжения и частота преобразования того или иного преобразователя, на основе которой формируется электростанция, зависит от принципа получения электроэнергии, ориентированного на максимально возможное получение КПД. Понятно, что кластер N_i с кластером M_j надо объединять через

установки (частотные преобразователи) согласования уровней. В результате нет никаких конфликтов в общей, объединенной, таким образом ОПЭЭС. Кому надо покупают оттуда энергию, а кто-то – продает ее излишки.

Несмотря на неоднородность электростанций по принципу получения электроэнергии, все они могут быть оптимизированы по однотипному инфраструктурному стандарту управления (рис. 2).

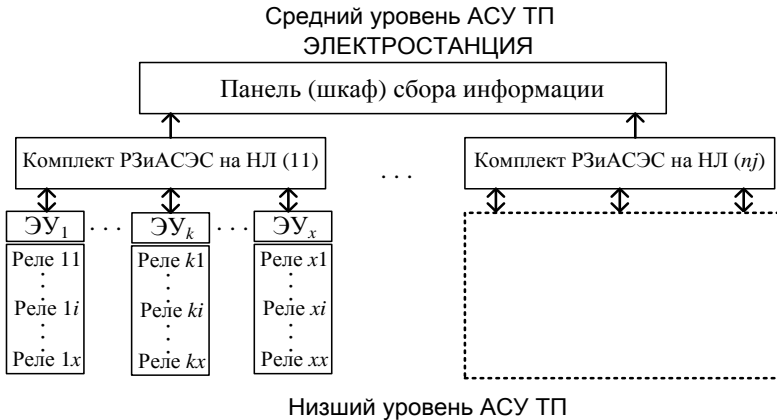


Рис. 2. Пример инфраструктуры управления:

ЭУ – электроустановка; РЗиАСЭС – релейная защита и автоматика энергосистем; НЛ – нечеткая логика

При этом принцип действия реле, входящих в комплекты РЗиАСЭС, работает на принципах нечёткой (fuzzy) логики.

Более того, подобные мультиагентные системы могут быть реализованы на самонастраивающихся регуляторах, применяемых ныне в активно-адаптивных сетях, с доработкой их IED на тот или иной метод машинного обучения, для которых вид используемых операторов менее важен, поскольку в ходе настройки регулятора его степени свободы (обобщённо – параметры функций принадлежности в нечётко-логическом блоке) при заданном диапазоне возможных отклонений изменяются с целью достижения максимально возможной точности.

Показанные принципы организации и управления мультиагентных сетей предполагают структурное и технологическое

изменение всей электроэнергетической отрасли на основе внедрения новых подходов в управлении и контроле ЭС. Основной парадигмой здесь является внедрение принципов разных подходов на основе различных направлений систем искусственного интеллекта: методы машинного обучения (ММО), ИНС, нечёткая логика (НЛ) и нечетко-логические сети (ННС), модели на основе регрессионного анализа, эволюционные (либо их подкласс – генетические) алгоритмы и пр.

При этом не требуется кардинально менять аппаратную часть, как это буквально понимают некоторые традиционалисты. На первое время требуется замена и адаптация программных продуктов под имеющиеся контроллеры и микропроцессоры. В дальнейшем постепенно накапливаемый опыт эксплуатации мультиагентных систем позволит сформулировать требования к стандартам подобных сетей и начать производить специализированные контроллеры под эти требования.

Ничего подобного в полном виде пока нет ни у одной из развитых стран. Но на это тратятся огромные деньги, но не в нашей стране, взявшей, на взгляд автора этой статьи, тупиковый путь цифровизации на навязанном нам когда-то «чужом» стандарте на основе стандартов МЭК 61850.

Выводы

1. Основой электроснабжения в ближайшие десятилетия станут кластеры разнородных по принципу получения электрической энергии электростанций, объединённые в мультиагентные сети.

2. Показанные принципы организации и управления мультиагентных сетей предполагают структурное и технологическое изменение всей электроэнергетической отрасли на основе внедрения новых подходов в управлении и контроле энергетической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров И.К. Применение нечеткологического управления в технических системах // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 2. – С. 8–18.

2. Никифоров И.К. Перспективы развития электроэнергетических сетей в виде мультиагентных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 2. – С. 13–21.

3. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подкопальников, В.В. Труфанов и др.; Отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015.

Автор

Никифоров Игорь Кронидович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета в 1989 году по специальности электрические аппараты. Защитил кандидатскую диссертацию в мае 2005 году в КАИ-КГТУ (г. Казань) по научной специальности 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. E-mail: pvr_001@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ТЕСТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЗА С ПОДДЕРЖКОЙ ПРОТОКОЛА МЭК 61850

Гаврилов А.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия

Казакова Е.Ю., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. *Активное внедрение в энергосистему цифровых устройств релейной защиты и автоматики на базе III архитектуры требует создания гибких средств для автоматизированной проверки: как для оценки работы функций релейной защиты и автоматики (РЗА), так и для соответствия реакции терминала РЗА на изменение сетевых параметров SV-потоков, в соответствии с корпоративным профилем МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС». Алгоритм такой автоматизированной проверки может быть реализован с помощью комплекса РЕТОМ-61850.*

Ключевые слова: *релейная защита, МЭК 61850, РЕТОМ-61850, SV, GOOSE.*

В настоящее время большое значение имеет проведение испытаний для проверки параметров и уставок различных функ-

Секция 1

ций цифровых микропроцессорных терминалов в составе цифровых подстанций (ЦПС). Также немаловажно осуществление проверки сетевых параметров на соответствие стандартам Корпоративного профиля МЭК 61850 [1].

Интерес к тестированию устройств РЗА с поддержкой МЭК 61850 – 9.2, состоит не только в соответствии корпоративному профилю, но и к тесту в условиях информационной нагрузки «шторм».

В настоящий момент требования по устойчивости информационного обмена и функционирования в условиях информационного шторма, согласно стандартам, предъявляются только к автоматизированным системам управления технологическим процессом (АСУТП) и микропроцессорным системам сбора и передачи информации (ССПИ).

В реальных условиях эксплуатации энергообъектов возникновение аварийных режимов приводит к информационной перегрузке локальных вычислительных сетей (ЛВС) [2].

Согласно стандарту, режим информационного всплеска характеризуется возникновением короткого замыкания на любом из присоединений подстанции, его неуспешного отключения, срабатывания устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ) и последовательным отключениям выключателей различных присоединений и погашением распределительного устройства и/или подстанции целиком. В результате аварии должно происходить отключение не менее половины выключателей моделируемой подстанции и срабатывание не менее половины терминалов микропроцессорной РЗА (МПРЗА), установленных на энергообъекте [3].

Проведение аналогичного тестирования невозможно осуществить с помощью стандартных программных средств для работы с РЕТОМ-61850.

Для этого разработано программное обеспечение «Генератор SV-поток МЭК-61850» которое предназначено для проведения гибкого тестирования согласно методике испытаний на соответствие корпоративному профилю МЭК-61850.

Перечень возможных реализаций испытания интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) РЗА ЦПС с применением

Секция 1

комплекса РЕТОМ-61850 и программного комплекса «Генератор SV-потоков МЭК-61850» приведён в таблице [4].

Таблица

Виды испытаний ИЭУ РЗА ЦПС

	Виды испытаний	Особенности и комментарии
1.	Проверка параметров срабатывания функций РЗА ИЭУ	Выдача до 20-ти SV-потоков для проверки ИЭУ РЗА 110 кВ и выше (в т.ч. дифференциальных защит автотрансформаторов, шин, линий с двумя выключателями и др.)
2.	Автоматизация испытаний ИЭУ РЗА на основе протокола МЭК 61850-8-1 MMS	Проверка функционирования измерительных органов по отчётам MMS (Report)
3.	Испытания ИЭУ РЗА при повышенной информационной нагрузке	Генерация до 80-ти потоков SV и 256-ти исходящих GOOSE с возможностью подключения к 4-м подсетям шины процесса и станции (с резервированием по протоколу PRP)
4.	Моделирование искажений данных в SV-потоках	Пропуски, перемешивание и смещение сетевых пакетов
5.	Моделирование искажений параметров в SV-потоках	Отключение, возможность ручного задания произвольного числа для различных опциональных полей: reserved, security, Dataset, RefrTm, SmpRate и т.д. Произвольные перемешивания ASDU внутри одного пакета, возможность задания дополнительных полей
6.	Моделирование задержки кадров SV-потока	Возможность удерживания пакетов SV в течение некоторого времени, а затем отправки задержанных сообщений одновременно (с минимальными временными промежутками между отправляемыми пакетами)
7.	Проверка параметров срабатывания функций РЗА ИЭУ	Выдача до 20-ти SV-потоков для проверки ИЭУ РЗА 110 кВ и выше (в т.ч. дифференциальных защит автотрансформаторов, шин, линий с двумя выключателями и др.)

Секция 1

Общая схема проведения испытаний представлена на рис. 1.

Как было сказано выше, одна из наиболее интересных частей функционала – создание повышенной информационной нагрузки – возможно не только за счёт увеличения количества одновременно выдаваемых потоков, но и за счёт увеличения количества выдаваемых пакетов в единицу времени.

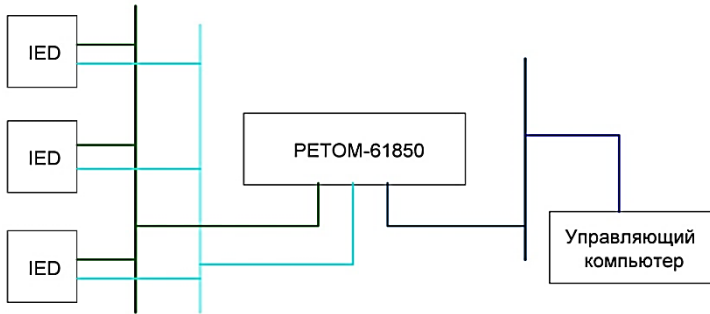


Рис. 1. Схема испытаний устройств РЗА с поддержкой МЭК-6180

Предлагаемый механизм реализации функции позволяет имитировать задержку пакетов в течении некоторого временного промежутка, с последующей выдачей этих пакетов в ЛВС. Такой механизм позволяет эмулировать процессы, возникающие при возникновении электронного шторма в шине 8.1 и 9.2, вследствие действия аварийных токов на преобразователи аналоговых и дискретных сигналов (ПАС, ПДС), сетевые коммутаторы, регистраторы аварийных событий (РАС) и другое оборудование ЦПС.

Механизм реализует расчёт времени между двумя соседними пакетами на основе установленного постоянного коэффициента смещения времени. Составлена последовательность из 3 режимов (рис.2), необходимых для проведения теста [5]:

1 Режим – доаварийный режим, включающий в себя известное число SV потоков;

2 Режим – режим непосредственно при информационном сбое в ЛВС, проявляющийся во временной паузе регистрируемых терминалом потоков (задержке);

Секция 1

3 Режим – режим, имитирующий выдачу такого количества пакетов, которые не были выданы за известное время доаварийного режима.

Использование коэффициента смещения времени позволяет установить минимальное время выдачи между соседними пакетами до 1 мкс, что соразмерно со точностью необходимой синхронизации пакетов по протоколу Precision Time Protocol (PTP) [6].

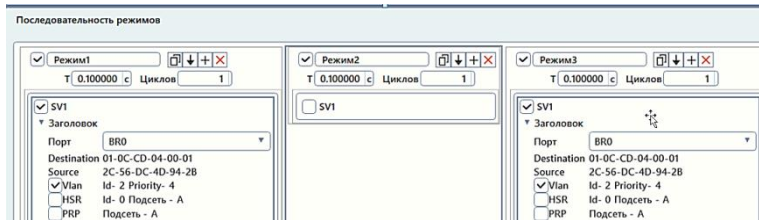


Рис. 2. Пример последовательности режимов

При захвате трафика ЛВС (рис.3) видно, что время выдачи между двумя соседними пакетами сокращается по сравнению со стандартными для 80 выб/пер - 4000 Гц (рис.3), пропорционально коэффициенту смещения времени, что может послужить механизмом имитации как задержки SV-потоков, так и информационного шторма в ЛВС.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length
738	0.201042264	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
739	0.201044904	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
740	0.201047216	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
741	0.201049872	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
742	0.201052192	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
743	0.201054984	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
744	0.201057552	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
745	0.201060176	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115
746	0.201062976	ASUSTekC_13:2d:3a	Iec-Tc57_04:00:01	IEC618...	115

Рис. 3. Захват SV-потоков

Осуществление автоматизированных проверок на соответствие корпоративному профилю может быть реализовано на основе алгоритмов генератора проверок для работы с прибором РЕТОМ – 21/61/71.

Таким образом, рассматриваемый механизм позволяет не только осуществлять комплексные проверки функций РЗА микропроцессорных терминалов, а также осуществлять проверку на

соответствие Корпоративному профилю МЭК 61850 и имитацию информационного шторма в ЦПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-25.040.30.309-2020 «Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС». Стандарт организации. Дата введения: 05.10.2020. ПАО «ФСК ЕЭС». М., 2022. – С. 2.

2. СТО 56947007-29.240.10.256-2018 «Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС». Стандарт организации. Дата введения 21.09.2018 г. ПАО «ФСК ЕЭС». М., 2021. – С. 89.

3. СТО 56947007-25.040.40.112-2011 «Типовая программа и методика испытаний программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами (ПТК АСУ ТП) и микропроцессорного комплекса системы сбора и передачи информации (МПК ССПИ) подстанций в режиме повышенной информационной нагрузки «шторм». Стандарт организации. Дата введения 30.12.2011 г. ПАО «ФСК ЕЭС». М., 2011. – С.3.

4. Шалимов А.С. Опыт периодических испытаний цифровых защит с поддержкой ИЕС 61850-8-1 и ИЕС 61850-9-2// Релейная защита и автоматизация, №44, 2021– С. 100–103.

5. Гаврилов А.А. Особенности разработки автоматической проверки цифровых устройств РЗА с помощью РЕТОМ-61850. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ – 2023: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса (16 октября 2023 г.). – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2023. – С. 39–44.

6. ИЕС 61850-9-3: Communication networks and systems for power utility automaton – Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation – Edition 2.0 2011-09 – С.13.

Авторы:

Гаврилов Алексей Алексеевич, инженер-исследователь, ООО «НПП «Динамика». магистрант 2-го курса факультета энергетики и электротехники, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: Gavrilov.A.A@yandex.ru.

Казакова Екатерина Юрьевна, старший преподаватель кафедры Электроснабжения и интеллектуальных систем имени А.А. Федорова, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: kazakova.eu@mail.ru.

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С НЕЛИНЕЙНЫМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ И ОГРАНИЧЕННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Алифов А.А., институт машиноведения им. А.А. Благодного РАН, г. Москва, Россия

***Аннотация.** Рассмотрено взаимодействие автоколебаний и параметрических колебаний при нелинейном параметрическом возбуждении, запаздывании в демпфировании и ограниченной мощности источника энергии. Методом прямой линеаризации выведены уравнения нестационарных и стационарных движений. С применением критериев Рауса-Гурвица получены условия устойчивости стационарных колебаний. Проведены расчеты для получения информации о влиянии запаздывания на свойства колебаний.*

***Ключевые слова:** автоколебания, параметрические колебания, взаимодействие, запаздывание, источник энергии, метод, прямая линеаризация.*

Рост объема потребляемой энергии, наряду с другими факторами, способствует экологическому кризису глобального масштаба. Уменьшение ее может внести определенный вклад в решение этой проблемы. В данном контексте стала актуальной теория колебаний с ограниченным возбуждением, созданная В.О. Кононенко [1] и развитая во множестве исследований в мире, в том числе в [2]. Целью настоящей работы является развитие теории колебательных систем с источниками энергии ограниченной мощности для расчета реальных объектов различного назначения. При наличии нелинейного параметрического возбуждения и запаздывания в демпфировании рассматривается модель взаимодействующей с источником энергии автоколебательной системы. Ряд задач при нелинейном параметрическом возбуждении и идеальном источнике энергии рассмотрены в [3]. А задачи с запаздыванием без учета ограниченной мощности источника энергии рассмотрены в достаточно большом числе работ [4-5 и др.]. Колебания под действием запаздывания возникают в целом ряде систем (электросистемы, следящие системы, регуляторы и др.).

Рассмотрим представленную на рис. 1 известную модель автоколебательной системы с источником энергии ограничен-

Секция 1

ной мощности, движение которой с учетом запаздывания в демпфировании описывается уравнениями

$$m\ddot{x} + k_0\dot{x} + c_0x = T(U) - k_\eta\dot{x}_\eta - bx^3 \cos vt, \\ J\ddot{\phi} = M(\dot{\phi}) - r_0T(U), \quad (1)$$

где $m, k_0, c_0, k_\eta, b, r_0$ – постоянные величины, $T(U)$ – вызывающая автоколебания сила трения, $U = r_0\dot{\phi} - \dot{x}$, $\dot{\phi}$ – скорость вращения двигателя, $\dot{x}_\eta = \dot{x}(t - \eta)M(\dot{\phi})T(U)$, $\eta = \text{const}$ – временной фактор запаздывания, v – частота параметрического воздействия, J – суммарный момент инерции вращающихся частей, $M(\dot{\phi})$ – с учетом сил сопротивления вращающий момент источника энергии.

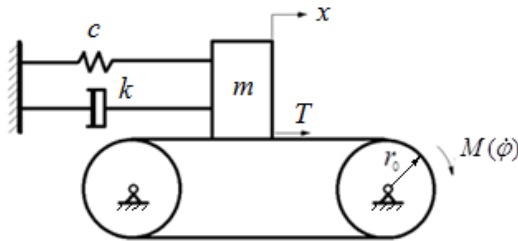


Рис. 1. Модель автоколебательной системы

Нелинейную силу $T(U)$ представим в широко распространенной на практике виде $T(U) = T_0[\text{sgn} U + f(\dot{x})]$, где $f(\dot{x}) = -\alpha_1 U + \alpha_3 U^3$, $T_0 = \text{const}$, $\text{sgn} U = 1$ при $U > 0$ и $\text{sgn} U = -1$ при $U < 0$. В случае относительного покоя имеет место $-T_0 \leq T(0) \leq T_0$. Линеаризуя нелинейную функцию $f(\dot{x})$ по методу прямой линеаризации [6, 7 и др.], имеем $f(\dot{x}) = B_f + k_f \dot{x}_\eta$. Коэффициенты линеаризации B_f и k_f , включающие параметр точности линеаризации r , определяются выражениями

$$B_f = -\alpha_1 u + \alpha_3 u^3 + 3N_2 \alpha_3 u v^2, \quad k_f = -\alpha_3 \bar{N}_3 (a^2 p^2 - h),$$

где $h = 3(u_0^2 - u^2) / \bar{N}_3$, $u_0^2 = \alpha_1 / 3\alpha_3$, $N_2 = (2r + 1) / (2r + 3)$,

Секция 1

$$\bar{N}_3 = (2r+3)/(2r+5).$$

Заметим, что при $r = 1.5$ получается число $\bar{N}_3 = 3/4$, если для решения (1) использовать метод усреднения [8].

Решения (1) можно построить методом прямой линеаризации. Искомые решения с учетом $\dot{x}_\eta = -ap \sin(\psi - p\eta)$ имеют вид

$$x = a \cos \psi, \quad \dot{x} = -ap \sin \psi, \quad \psi = pt + \xi, \quad \dot{\phi} = \Omega.$$

При $u \geq ap$ имеют место уравнения

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= -\frac{a}{4pm} (2A - 0.5ba^2 \sin 2\xi), \\ \frac{d\xi}{dt} &= \frac{1}{4pm} (2E + ba^2 \cos 2\xi), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{r_0}{J} \left[M\left(\frac{u}{r}\right) - S(u) \right],$$

где $A = p(k_0 + k_\eta \cos p\eta - T_0 k_f)$, $E = m(\omega_0^2 - p^2) + pk_\eta \sin p\eta$, $\omega_0^2 = c_0/m$.

Здесь $S(u) = r_0 T_0 (1 + B_f)$ и представляет нагрузку на источник энергии со стороны колебательной системы.

Для определения амплитуды и фазы из первых двух уравнений (2) получим

$$4(E^2 + 4A^2) = b^2 a^4, \quad \operatorname{tg} 2\xi = -2A/E. \quad (3)$$

Амплитуда в случае $u < ap$ определяется приближенным выражением $a\omega \approx u$.

Составив для (2) уравнения в вариациях и используя критерии Рауса-Гурвица, получим условия устойчивости стационарных движений

$$D_1 > 0, \quad D_3 > 0, \quad D_1 D_2 - D_3 > 0, \quad (4)$$

где $D_1 = -(b_{11} + b_{22} + b_{33})$,

$$D_2 = b_{11} b_{33} + b_{11} b_{22} + b_{22} b_{33} - b_{23} b_{32} - b_{12} b_{21} - b_{13} b_{31},$$

$$D_3 = b_{11} b_{23} b_{32} + b_{12} b_{21} b_{33} + b_{22} b_{13} b_{31} - b_{11} b_{22} b_{33} - b_{12} b_{23} b_{31} - b_{13} b_{21} b_{32}.$$

Секция 1

В случае $u < ar$ имеем

$$b_{11} = \frac{r_0}{J} \left(Q - r_0 T_0 \frac{\partial B_f}{\partial u} \right), \quad b_{12} = -\frac{r_0^2 T_0}{J} \frac{\partial B_f}{\partial a}, \quad b_{13} = 0, \quad b_{21} = a \frac{T_0}{2m} \frac{\partial k_f}{\partial u},$$

$$b_{22} = -\frac{1}{8pm} \left[4(A + a \frac{\partial A}{\partial a}) - 3ba^2 \sin 2\xi \right], \quad b_{23} = \frac{ba^3}{4pm} \cos 2\xi, \quad b_{31} = 0,$$

$$b_{32} = \frac{1}{2pm} \left[\frac{\partial E}{\partial a} + ba \cos 2\xi \right], \quad b_{33} = -\frac{ba^2}{2pm} \sin 2\xi,$$

где $Q = \frac{d}{du} M \left(\frac{u}{r} \right)$ определяет крутизну характеристики источника энергии.

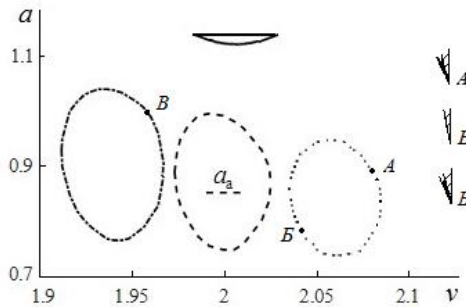


Рис. 2. Амплитудно-частотные кривые

Были проведены расчеты для получения информации о совместном влиянии нелинейного параметрического возбуждения и запаздывания в демпфировании на динамику колебаний. На рис. 2 представлены некоторые из амплитудно-частотных кривых, полученных в результате этих расчетов при параметре точности линеаризации $r = 1.5$ и ряде параметров, в частности, скорости $u = 1.14$. Штриховая кривая соответствует отсутствию запаздывания ($k_\eta = 0$, $\eta = 0$, a_a – амплитуда автоколебаний) и приведена для сравнения, пунктирная – $p\eta = \pi/2$, сплошная – $p\eta = \pi$, штрих-пунктирная – $p\eta = 3\pi/2$. Горизонтальная прямая при $p\eta = \pi$ соответствует $a\omega \approx u$.

Колебания устойчивы в пределах заштрихованных секторов для крутизны характеристики источника энергии. Эти секторы для краткости показаны на амплитудных кривых, хотя должны быть указаны на графике нагрузки на источник энергии. Условие (или условия) устойчивости (4) выполняются в пределах секторов черного цвета в виде $0.000X > 0$, где $X \leq 9$, т. е. имеет место слабая устойчивость. На ряде участков кривых имеется еще более слабая устойчивость в виде $0.0000Y > 0$, где $Y \leq 9$. Заметим, что при *линейном* параметрическом возбуждении и *отсутствии* запаздывания устойчивыми являются лишь амплитуды, которые больше амплитуды автоколебаний, т.е. верхняя часть амплитудной кривой. Однако при *нелинейном* параметрическом возбуждении и *наличии* определенных значений запаздывания возникает иная ситуация: на нижней ветви амплитудной кривой может появиться устойчивость, что видно на примере точки *Б* при $r\eta = \pi/2$.

Выводы

Величина запаздывания оказывает влияние на вид амплитудно-частотных кривых и их расположение относительно собственной частоты системы, а также на устойчивость колебаний. Амплитудно-частотные кривые сдвигаются в частотной области вправо/влево, вверх/вниз в зависимости от этой величины. Использование метода прямой линеаризации весьма существенно облегчает, по сравнению с известными методами нелинейной механики, вывод уравнений для расчета амплитуд и фаз колебаний, скорости источника энергии. Такое преимущество метода очень важно для проведения расчетов на практике при разработке устройств различного назначения, ибо не каждый научный работник в технической сфере умеет пользоваться методами нелинейной механики, не говоря об инженерах и конструкторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. / В.О. Кононенко. – М.: Наука, 1964. – 236 с.
2. Алифов А.А. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источниками энергии / А.А. Алифов, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
3. Шмидт Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. – М.: Мир, 1978. – 336 с.

4. Рубаник В.П. Колебания квазилинейных систем с запаздыванием / В.П.Рубаник. – М.: Наука, 1969. – 288 с.

5. Кащенко С.А. Динамика логистического уравнения с запаздыванием и диффузией и с быстро осциллирующими по пространственной переменной коэффициентами // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 482. № 5. – С. 508–512.

6. Алифов А.А. Методы прямой линеаризации для расчета нелинейных систем / А.А.Алифов. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2015. – 74 с.

7. Алифов А.А. Метод прямой линеаризации для расчета нелинейных систем // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. С.10–12.

8. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н.Боголюбов, Ю.А.Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 504 с.

Автор

Алифов Алишир Али оглы, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, окончил механический факультет Азербайджанского политехнического института в 1971 году. Получил докторскую степень в 1986 году, защитив диссертацию по динамике нелинейных систем машин и механизмов. E-mail: a.alifov@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Джураев М.М., Рахимов О.С., Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Республика Таджикистан

Каландаров Х.У., Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В работе рассматривается исследование операционных усилителей (ОУ) и устройств на их основе. Это устройство, представляет собой интегральную микросхему, способную усиливать разность входных сигналов. ОУ широко применяются в электронике для выполнения различных функций, таких как усиление сигналов, фильтрация, суммирование, интегрирование и дифференцирование. ОУ имеет большое практическое значение для разработки и проекти-

рования электронных устройств и систем. Понимание работы ОУ и их применение позволяет создавать более эффективные и надежные устройства для различных областей применения, таких как автоматика, измерительная техника, телекоммуникации, медицинская аппаратура и другие.

Ключевые слова: *операционный усилитель, интегральная микросхема, сигнал, усиление сигналов, коэффициент усиления, фильтрация.*

Операционный усилитель (ОУ) – это устройство, которое представляет собой интегральную микросхему, способную усиливать разность входных сигналов. ОУ широко применяются в электронике для выполнения различных функций, таких как усиление сигналов, фильтрация, суммирование, интегрирование и дифференцирование.

Исследование ОУ и устройства на их основе включает в себя изучение основных характеристик ОУ, таких как входное сопротивление, коэффициент усиления, полоса пропускания, выходное сопротивление и т.д. Также проводится анализ способов подключения ОУ и их влияния на характеристики устройства.

Кроме того, исследование включает в себя изучение различных схем и устройств на основе ОУ, таких как усилители с обратной связью, компараторы, интеграторы, дифференциаторы, фильтры и другие. Изучение этих устройств позволяет понять их принцип работы, возможности и ограничения.

Цель работы анализ основных характеристик ОУ и исследование сходных и импульсивных устройств на основе ОУ на базе прикладной программы NI Multisim.

В работе [1] рассматривался исследование и моделирование схемы трёхфазного выпрямителя на NI Multisim 14, а в [2] структура и свойства среды моделирования схемы электронных устройств на NI Multisim 14. Данной программой методы проектирования и испытания моделей различных электронных устройств легко изучается, удобная для моделирования и построения различных характеристик промышленных приборов. Применение особенностей прикладной программы Multisim для моделирования и исследования и представления электронных схем, распределительной электрической сети, режима работы электродвигателей позволяет обнаружить различные характери-

стики электрической схеме любой сложности [1]. Точность полученной информации всегда зависит от правильности построения схемы и фиксации параметров исследуемого элемента или устройства. Для создания более сложных структур используется модульный принцип, то есть сложные устройства создаются из простых схем, состоящих из резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов, логических элементов, операционных усилителей и цифровых микросхем [2]. В работе [3] рассмотрено моделирование преобразователя напряжения в частоту в среде NI Multisim.

В ХПИТТУ для укрепления теоретических знаний по дисциплине «Основы электроники» и приобретения практических навыков, в рамках проведения лабораторных работ исследуются операционные усилители с инвертирующими и неинвертирующими входами, а также различные конструкции на основе операционных усилителей.

Для исследования усилителя в рабочей области виртуальной электронной лаборатории, применяются операционный усилитель (из файла «Открыть примеры» программы MultiSim), активные электрические нагрузки, мультиметры для измерения напряжения и тока на входных и выходных зажимах усилителя, двухканальный цифровой осциллограф и плоттер для создания частотных характеристик усилителя.

В виртуальной лаборатории подбираются источники питания постоянного и переменного тока для проведения экспериментов по получению рабочих и частотных характеристик.

В рабочем окне программы Multisim строят схему операционного усилителя (на рис. 1 приведена схема из готовых примеров программы summer). Для измерения напряжения на входе и выходе усилителя должны быть подключены вольтметры.

Для исследуемого операционного усилителя рассмотрим два варианта построения характеристик. В первом случае на основе источника постоянного тока и во втором – на основе источника синусоидального тока.

Напряжение источника постоянного тока V_4 изменяют с 0 до 1 В с шагом 0,1 В, чтобы получить зависимость напряжения во выходных зажимах от напряжения на входных зажимах усилителя. Результаты измерений вводятся в таблице.

Секция 1

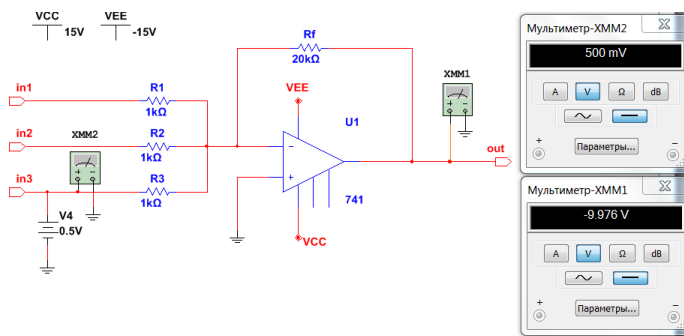


Рис. 1. Схема операционного усилителя

Таблица

Результаты измерения напряжения на входных и выходных зажимах ОУ для построения амплитудной характеристики

$u_{\text{ВХ}}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1
$u_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									
K_U									

Для построения характеристик ОУ на переменном токе, необходимо подключить в схему источник синусоидального напряжения (рис. 2).

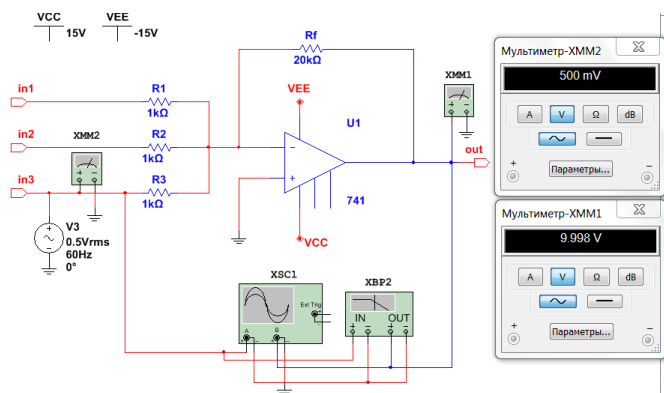
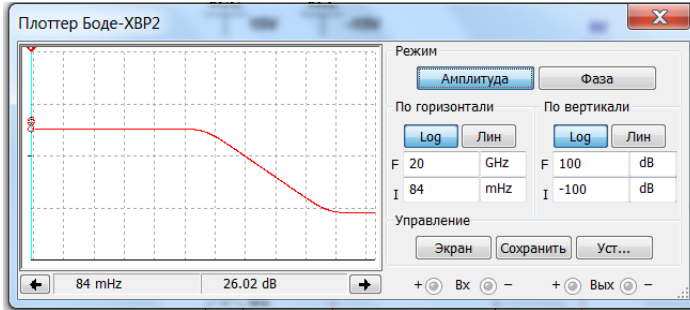


Рис. 2. Схема операционного усилителя для синусоидального тока

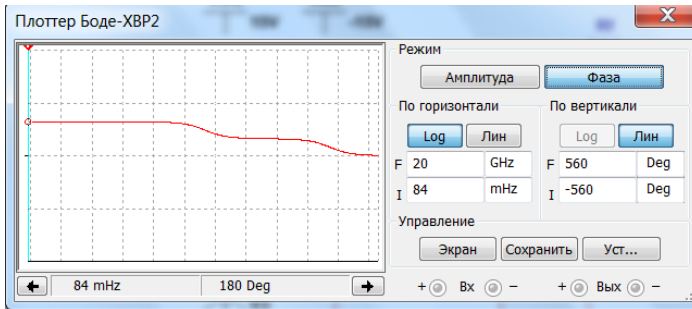
Для построения амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристики (рис. 3) в схему исследуемого ОУ подключаем плоттер.

Секция 1

Из изображений приведённых на рис. 3 видно, что на плоттере в режиме измерения амплитуды наблюдается резкое снижение кривой графика амплитудно-частотной характеристики (рис. 3, а), а на плоттере в режиме измерения фазы, кривая фазо-частотной характеристики (рис. 3, б) снижается плавно.



а



б

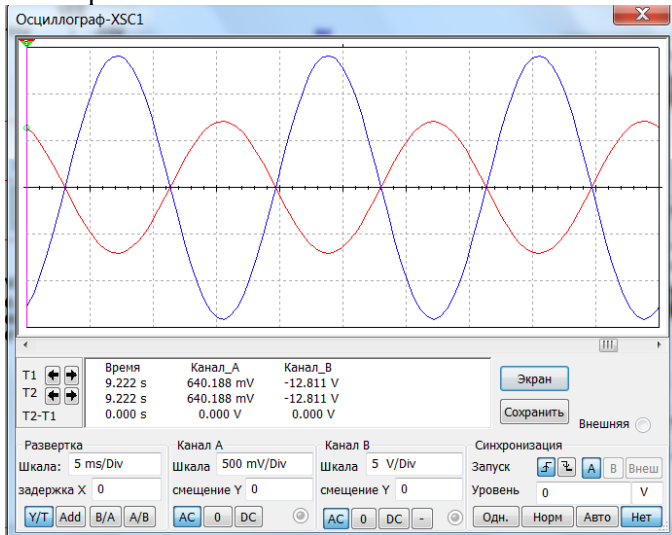
Рис. 3. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики операционного усилителя

Далее для линейных и нелинейных участков графика амплитудной характеристики определяют коэффициент усиления по напряжению с помощью осциллограмм напряжения на входных и выходных зажимах усилителя (рис. 4).

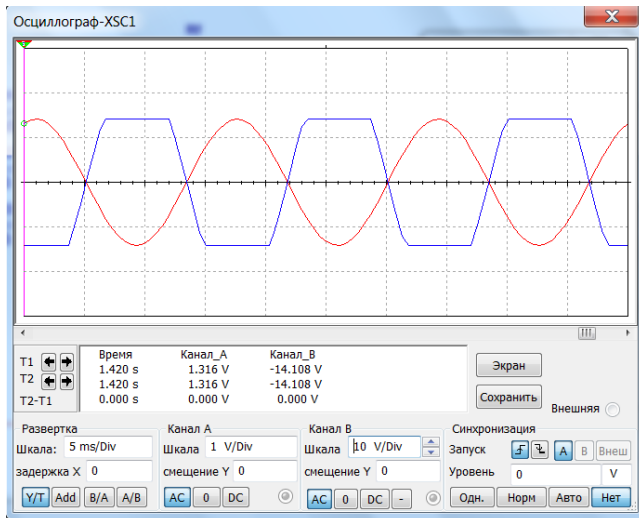
В этом случае для измерения напряжения на входных и выходных зажимах усилителя подключают вольтметры и для получения осциллограмм напряжения в схему подключают двухканальный осциллограф и для построения амплитудно-

Секция 1

частотных и фазово-частотных характеристик в схему подключают плоттер.



а



б

Рис. 4. Осциллограмма напряжений на входном и выходном зажимах ОУ для линейной (а) и нелинейной (б) амплитудной характеристики

Таким образом, результаты осциллограмм напряжений показывают, что после замены источника постоянного тока на синусоидальный во входных зажимах устройства, на выходных зажимах скачкообразное изменение кривой графика линейной амплитудной характеристики ОУ (рис.4, *а*) усиливается сразу.

При нелинейной амплитудной характеристики ОУ (рис.4, *б*) на выходных зажимах устройства изменяется только форма кривой графика осциллограммы напряжения.

Выводы

Исследование операционных усилителей и устройства на их основе имеет большое практическое значение для разработки и проектирования электронных устройств и систем. Понимание работы ОУ и их применение позволяет создавать более эффективные и надежные устройства для различных областей применения, таких как автоматика, измерительная техника, телекоммуникации, медицинская аппаратура и другие.

Для быстрого и наглядного анализа графических характеристик амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик ОУ и линейной и нелинейной форм амплитудных характеристик устройства на базе прикладной программы NI Multisim подключение плоттера и осциллографа напряжений дают возможность получить результаты исследования различных электронных компонентов сложных устройств в виде графических изображений. Кроме этого, для изменения формы кривых амплитудных характеристик можно применять интегральные и дифференциальные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Джураев М.М.* Исследование и моделирование схемы трёхфазного выпрямителя на NI Multisim 14 / М.М. Джураев, О.С. Рахимов, Х.У. Каландаров // Сборник докладов Международной научной конференции «Нигматуллинские чтения – 2023», 9–12 октября 2023 года. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. – С. 265–272.

2. Рахимов, О.С. Сохтор ва хосиятҳои муҳити моделиронии схемаи сохтҳои электронӣ дар NI Multisim 14 / О.С. Рахимов, Х.У. Каландаров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2023. – No. 1(26). – P. 31-45. – EDN ХМНРКJ.

3. Ланкин, А.М. Моделирование преобразователя напряжения в частоту в среде NI Multisim / А.М. Ланкин // Перспективы науки. – 2023. – № 8(167). – С. 32–35.

Авторы:

Джурраев Мухсинжон Максуджонович, ассистент кафедры электроснабжения и автоматики, докторант PhD 1-го года обучения по специальности «6D071800 – Электроэнергетика» Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими (ХПИТТУ). В 2021 году окончил с отличием факультет информатики и энергетики ХПИТТУ, получил диплом бакалавра инженер-энергетик по специальности «Электроснабжение». В 2023 году окончил магистратуру ХПИТТУ, получил степень магистра техники технологии по специальности «Электроснабжение», защитил магистерскую диссертацию по теме «Энергосбережение в городских распределительных электрических сетях». E-mail: muhsin0799@mail.ru.

Рахимов Охунбобо Сайфиддинович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и автоматика» Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. В 1971 году окончил электромеханический факультет «Московский ордена Ленина энергетический институт», получил квалификацию инженера-электрика по специальности «Электроизоляционная и кабельная техника». В 1977 году защитил кандидатскую диссертацию в Московском горном институте по теме «Разработка метода и исследование состояния изоляции подземных электроустановок напряжением до 1000 В рудников цветной металлургии Средней Азии. E-mail: rahimov_o_1948@mail.ru.

Каландаров Хусейнджон Умарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-энергетические системы» Чебоксарского института (филиал) Московского политехнического университета. В 2009 году окончил с отличием технологический факультет Худжандского филиала Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, получил квалификацию инженера-электрика по специальности «Электроснабжение». В 2016 году защитил кандидатскую диссертацию в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по теме «Исследование работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов. E-mail: huseinjon.86@mail.ru.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО ВЫРАВНИВАНИЯ ТОКОВ ПЛЕЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Иванов В.А., Салмин А.Г., АО «ЧЭАЗ», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация:** В данной работе предложен универсальный алгоритм цифрового выравнивания токов плеч для дифференциальной защиты трансформатора. Реализована модель предложенного алгоритма. На примере двухобмоточного трансформатора проверена эффективность алгоритма.*

***Ключевые слова:** релейная защита, дифференциальная защита трансформатора, цифровое выравнивание.*

При выполнении дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) требуется предварительное преобразование токов отдельных сторон (плеч). Это обусловлено следующими факторами:

- различия номинальных напряжений отдельных сторон трансформатора и номинальных мощностей обмоток;
- различие номинальных токов силового трансформатора и трансформатора тока (ТТ), установленного на соответствующей стороне;
- фазовый сдвиг между токами отдельных сторон трансформатора, обусловленный схемой и группой соединения его обмоток, а также полярностью подключения ТТ и схемой соединения его вторичных обмоток.

Таким образом, для обеспечения селективности ДЗТ необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов по величине и фазе.

В современных цифровых устройствах ДЗТ выравнивание вторичных токов плеч осуществляется программно, что позволяет исключить использование внешних промежуточных трансформаторов и автотрансформаторов [1, 2]. Однако, производители РЗА учитывают не все вышеприведенные факторы программно, а определенные аспекты учтены на уровне схемы. Поэтому в данной работе представлен универсальный алгоритм

цифрового выравнивания токов плеч, который учитывает все аспекты при построении ДЗТ.

Описание предлагаемого алгоритма

На рис. 1 представлена последовательность действий предлагаемого алгоритма цифрового выравнивания токов на примере двухобмоточного трансформатора.

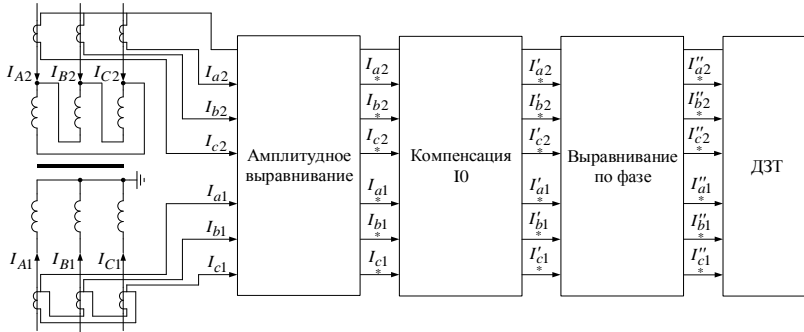


Рис. 1. Алгоритм цифрового выравнивания

Как видно на рис. 1, в первую очередь осуществляется амплитудное выравнивание токов, поступающих с каждой стороны трансформатора I_{aj}, I_{bj}, I_{cj} , А:

$$\begin{bmatrix} I_{aj} \\ I_{bj} \\ I_{cj} \end{bmatrix} = \frac{k_{выр,j}}{I_{ex.ном,j}} \begin{bmatrix} I_{aj} \\ I_{bj} \\ I_{cj} \end{bmatrix},$$

где I_{aj}, I_{bj}, I_{cj} – вторичные фазные токи j -ой стороны, выровненные по амплитуде, о.е.; $k_{выр,j}$ – коэффициент цифрового выравнивания j -ой стороны, о.е.; $I_{ex.ном,j}$ – номинальный ток ТТ входа терминала, подключенного к ИТТ j -ой стороны, А.

Коэффициенты цифрового выравнивания рассчитываются известным способом, согласно методике, описанной в [1, 2]. При расчете коэффициентов учитывается схема соединения вторичных цепей ТТ.

После процедуры амплитудного выравнивания производится исключение тока нулевой последовательности [3]:

$$\begin{bmatrix} I'_{aj} \\ I'_{bj} \\ I'_{cj} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aj} \\ I_{bj} \\ I_{cj} \end{bmatrix}$$

Следующим этапом, согласно рис. 1, необходимо выполнить выравнивание вторичных токов по фазе. На данном этапе производится выравнивание вторичных токов в соответствии с схемами соединения вторичных обмоток ТТ и группой соединения обмоток трансформатора.

Угол сдвига всех векторов тока определяется относительно базисного вектора, в качестве которого выступает сторона высшего напряжения трансформатора.

Проанализировав векторные диаграммы токов при различных схемах соединения вторичных обмоток ТТ, получено общее выражение:

$$\begin{bmatrix} I''_{aj} \\ I''_{bj} \\ I''_{cj} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2|k_{BH} - k_j| + 1}} \begin{bmatrix} 1 & k_{BH}(k_j - 1) & k_j(k_{BH} - 1) \\ k_j(k_{BH} - 1) & 1 & k_{BH}(k_j - 1) \\ k_{BH}(k_j - 1) & k_j(k_{BH} - 1) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{aj} \\ I'_{bj} \\ I'_{cj} \end{bmatrix}$$

где k_{BH}, k_j – коэффициенты, учитывающие схему соединения вторичных обмоток ИТТ на стороне ВН и j -ой стороны (СН или НН), о.е.

При соединении вторичных обмоток ИТТ по схеме «треугольник» коэффициенты k_{BH}, k_j принимают значение, равно 1, а при соединении по схеме «звезды» принимают значение, равное 0.

При учете схемы соединения вторичных обмоток ТТ следует также обращать внимание на полярность соединения обмоток. Как правило, токи со всех сторон трансформатора измеряются в направлении к защищаемому объекту (встречное включение ТТ). Если же ТТ подключены таким образом, что ток измеряется в противоположном от объекта направлении (соглас-

ное включение ТТ), то вторичные токи можно программно развернуть, применяя множитель -1.

Для вычисления скомпенсированных токов в соответствии с группой соединения обмоток трансформатора для вторичных токов сторон СН и НН следует воспользоваться следующим выражением [3]:

$$\begin{bmatrix} I''_{aj} \\ I''_{bj} \\ I''_{cj} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(n \cdot 30^\circ) & \cos((n+4) \cdot 30^\circ) & \cos((n-4) \cdot 30^\circ) \\ \cos((n-4) \cdot 30^\circ) & \cos(n \cdot 30^\circ) & \cos((n+4) \cdot 30^\circ) \\ \cos((n+4) \cdot 30^\circ) & \cos((n-4) \cdot 30^\circ) & \cos(n \cdot 30^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'''_{aj} \\ I'''_{bj} \\ I'''_{cj} \end{bmatrix}$$

В дальнейшем, полученные после цифрового выравнивания токи участвуют в вычисления дифференциальных и тормозных токов.

Проведение эксперимента

На рис. 2 представлена модель алгоритма цифрового выравнивания токов реализованная в программно-моделирующем комплексе MATLAB/Simulink. Данная модель применима для трансформаторов с числом обмоток до четырех.

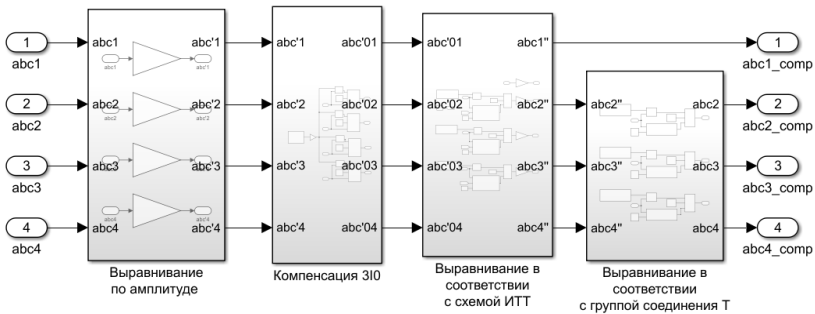


Рис. 2. Модель алгоритма цифрового выравнивания

Для проверки эффективности модели предлагается использовать модель ЭЭС с понижающим двухобмоточным трансформатором, представленной на рис. 3. Параметры элементов электрической системы приведены в таблице.

Секция 1

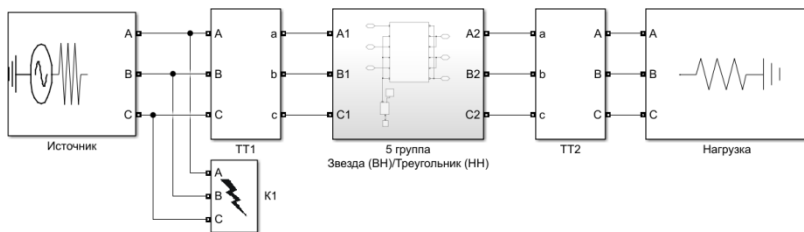


Рис. 3. Модель электрической системы

Таблица

Параметры элементов электрической системы

Элемент ЭЭС	Наименование параметра	Значение
Источник питания	Напряжение, кВ	110
	Внутреннее сопротивление, Ом	10
Трансформатор	Группа соединения	5
	Тип соединения обмоток	Yн/Δ
	Номинальная мощность, МВА	125
	Номинальное напряжение ВН, кВ	115
	Номинальное напряжение НН, кВ	10,5
	Напряжение КЗ%	10,5
	Потери КЗ, кВт	400
	Потери ХХ, кВт	100
	Ток ХХ, %	0,55
ТТ	Тип соединения обмоток	Y/Δ
	Коэффициент трансформации ТТ1	600/5
	Коэффициент трансформации ТТ2	6000/5
Нагрузка	Напряжение нагрузки, кВ	10
	Мощность нагрузки, МВт	100

Следует отметить, что ТТ1 и ТТ2 включены согласно. ТТ2 подключен противоположно принятым правилам.

Проверка алгоритма осуществляется посредством моделирования нагрузочного режима и режима однофазного КЗ в точке К1.

Результаты моделирования представлены в виде векторных диаграмм, приведенных на рис. 4 и 5. Для удобства просмотра векторные диаграммы построены по фазе А. Векторные диаграммы построены с помощью программы анализа осциллограмм BSV от производителя АО «ЧЭАЗ».

Секция 1

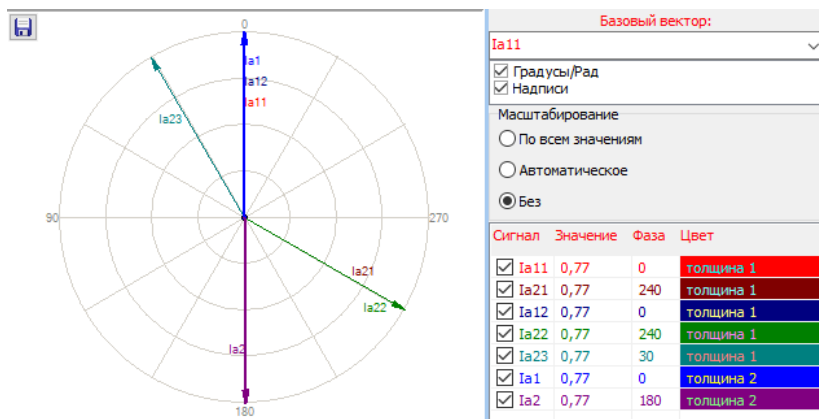


Рис. 4. Векторная диаграмма токов по фазе А при нагрузочном режиме: I_{a1}, I_{a2} – выровненные токи, I_{a11}, I_{a21} – токи после амплитудного выравнивания, I_{a12}, I_{a22} – токи после компенсации I_0 , I_{a23} – токи выровненные в соответствии с схемой ТТ

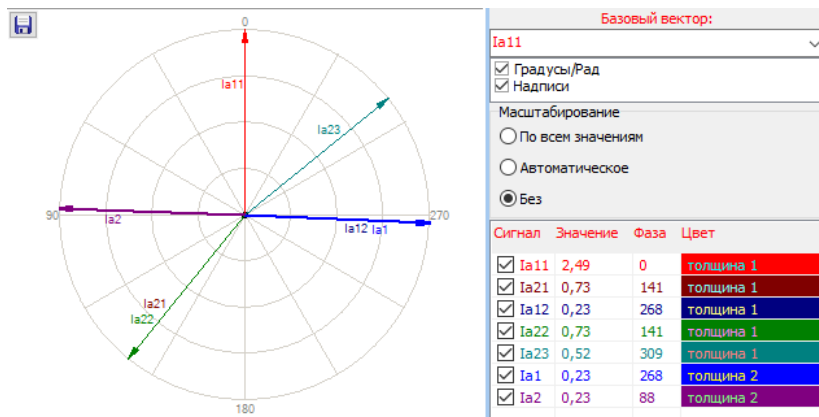


Рис. 5. Векторная диаграмма токов по фазе А при однофазном КЗ

Анализируя векторные диаграммы можно сделать следующие выводы:

- значения конечных токов равны по величине, что свидетельствует о правильности выполнения амплитудного выравнивания;

Секция 1

– во втором испытании, в результате внешнего КЗ, присутствует I_0 , который успешно компенсируется на втором этапе алгоритма;

– модель успешно скомпенсировала фазовый сдвиг, вызванный полярностью и схемой соединения ТТ на стороне НН, а также группой соединения обмоток силового трансформатора;

– в результате цифрового выравнивания конечные токи равны по значению и сдвинуты на 180° при внешнем и нагруженном режимах, что свидетельствует о корректном функционировании модели и алгоритма.

Выводы

1. Предложен универсальный алгоритм цифрового выравнивания токов плеч для дифференциальной защиты трансформатора.

2. Предложенный алгоритм был реализован в виде модели, которая была проверена на двухобмоточном трансформаторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терминал защиты трансформатора 110-220 кВ типа «ТОР 300 ДЗТ 5ХХ». Руководство по эксплуатации. Описание функций защит. АИПБ.656122.011-002 РЭ2 v21.1. Чебоксары.

2. Терминал основных и резервных защит двухобмоточного трансформатора БРЕСЛЕР-0107.700. Руководство по эксплуатации. БРСН.656122.700 РЭ. Чебоксары.

3. Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ДЗТ4. Руководство по эксплуатации. БКЖИ.656316.004-48.01.

4. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения; под ред. Ф. Дьякова. – Нюрнберг, 2005. – 273 с.

Авторы:

Иванов Василий Александрович, см. стр. 75.

Салмин Александр Геннадьевич, см. стр. 75.

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕРВЕРА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ SCADA СИСТЕМЫ В ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Михайлов С.А., Баннов А.Е., научный руководитель **Журавлёв И.И.**, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

***Аннотация.** В работе описана концепция работы сервера базы данных в составе SCADA системы в объектах электроэнергетики на основе разработанной логической модели. Модель систематизирует данные с получаемой информацией от подключенных к SCADA системе объектов электроэнергетики, а также от пользователей. Обрабатываемым данным присваивается тег, представляющий собой информацию, и идентификатор, описывающий свойства данных.*

***Ключевые слова:** сервер базы данных, база данных, SCADA система, логическая модель.*

В настоящее время в электроэнергетике актуальна проблема управления и сбора данных устройств в составе электрической сети. Для этих целей применяются SCADA системы, в которых сервер базы данных функционирует посредством логической модели.

Существующие базы данных не всегда применимы в системах промышленной автоматизации. Можно выделить несколько основных ограничений.

— Производственные процессы генерируют данные очень быстро. Например, за одну секунду в производственную базу данных с 7500 рабочими переменными необходимо вставлять 7500 записей. Обычные базы данных не могут выдержать подобную нагрузку.

— Не всегда удаётся хранить всю производственную информацию. Как пример, многомесячный архив завода с 7500 рабочими переменными требует под БД дисковой памяти объемом около 1 Терабайта. Сегодняшние технологии такими объемами манипулировать не могут (19,44 Гб за 1 месяц при опросе раз в секунду).

При создании клиент-серверной архитектуры с применением баз данных в составе SCADA систем необходимо реализо-

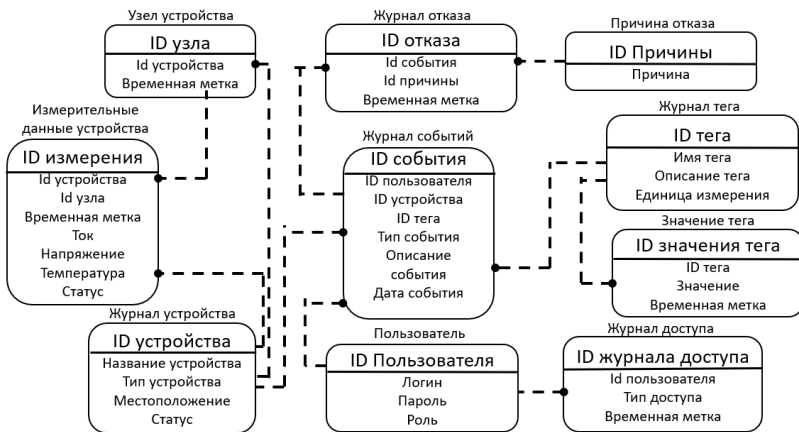
вать соответствие баз данных вышеперечисленным требованиям. Это можно осуществить двумя способами:

1. Создание собственной СУБД. Этот путь является длительным и трудоемким. К тому же, возникает проблема интегрирования созданной СУБД со стандартными офисными приложениями.

2. Использование существующей СУБД в качестве базовой, и создание для нее надстроек, необходимых для реализации всех функциональных задач такой SCADA системы. В этом случае обеспечивается совместимость базы данных с офисными приложениями, возможность обмена данными по Интернет и соответствие другим требованиям [1].

Логическая модель определяет концепцию реализации сервера базы данных SCADA системы. Такая модель включает в себя журналы событий, регистрирующие действия устройств электроники, входящих в состав SCADA системы, пользователей, а также самого сервера с базой данных. Журналы событий в рамках разработки концепции построения сервера базы данных для цифровой инфраструктуры непосредственно связаны с тегами, несущих в себе информационную составляющую данных [2].

На рисунке представлена логическая модель базы данных (БД) для SCADA-системы.



Логическая модель сервера базы данных для цифровой инфраструктуры

Концепция сервера базы данных состоит из 10 таблиц данных. Все таблицы в данной логической модели связаны между собой при помощи различных ключей. Это является основой для реляционной модели базы данных. Указание меток реального времени в некоторых таблицах присуще базам данных реального времени, которые, как и реляционные, применимы в SCADA-системах. Таблица журнала событий хранит список произошедших событий с данными сервера БД с их временной меткой, а также указанием устройства, на котором произошло конкретное событие. Журнал отказа связан с таблицей причин отказов и хранит в себе данные со временем и тегом события, по которому происходит отказ. Это может быть как отказ какого-либо из устройств, подключенных к SCADA системе, так и отказ в правах доступа клиента к такой цифровой инфраструктуре.

Данные об электронных устройствах, включенных в цифровую SCADA систему, хранятся и преобразуются в таблицах узла устройства, измерительных данных и журнала устройства. Таких таблиц может быть несколько в зависимости от количества устройств, входящих в SCADA систему. Таблицы данных осуществляют сбор информации с датчиков устройств, содержат данные о произошедших событиях в устройстве (авария или технологическое нарушение, превышение уставки устройств РЗА, выход в режим байпас, переход на ручное управление и другие события), присваивая каждому устройству в сети конкретный ID, с присвоением тегов данных с такого устройства и привязкой ко времени с событиями. Таким образом, таблицы данных электронных устройств, подключенных к SCADA системе, могут требовать достаточно большой объем данных относительно требуемого объема памяти для хранения данных всей SCADA системы. Этот фактор требует обязательного вычисления объема трафика и данных, получаемых и хранящихся в таблицах БД для электронных устройств для корректного функционирования сервера БД в составе цифровой инфраструктуры на основе SCADA системы.

Таблицы пользователя и журнала доступа хранят информацию о конкретном клиенте SCADA системе и фиксируют все его действия внутри цифровой инфраструктуры такой логической модели. Таким образом, концепция сервера базы данных

предполагает жесткий контроль действий всех пользователей SCADA системы, а также имеет высокий уровень защиты от несанкционированных и потенциально опасных для работоспособности системы и электронных устройств, подключенных к такой SCADA системе, действий посредством администрирования учетных записей все пользователей.

Выводы

Таким образом, разработанная логическая модель сервера базы данных призвана обеспечить его корректную работу в составе SCADA системы, позволяя упорядочить систему хранения данных, облегчить обращение к серверу базы данных другим составляющим SCADA системы с помощью журнала событий, хранящего конкретные теги, систематизации и классификации. За счёт этого происходит уменьшение объёма хранимой информации, из которой выделяются только события, связанные с отказами. В данной системе также предусмотрен контроль доступа клиента, который не имеет прав доступа или утратил их в силу каких-то причин. Подобные системы можно применять при автоматизации в различных областях, в том числе и в объектах электроэнергетики, к примеру, в зарядных станциях для электромобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Оскерко В.С.* Лекция на тему «ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ» – URL: http://bseu.by/it/tohod/lekcii4_6.htm.

2. Яковлева, А.А. База данных для SCADA-системы кустовой площадки / А.А. Яковлева // СТУДЕНЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ: сборник статей VII Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 февраля 2020 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 16–22. – EDN RJMONS.

Авторы:

Журавлёв Иван Исмаилович, НИУ «МЭИ», ассистент кафедры ПЭ. Окончил бакалавриат кафедры «Радиотехника и электроника» в 2019 году, в 2023 году окончил аспирантуру той же кафедры. E-mail: ivanizhuravlev@gmail.com.

Михайлов Сергей Александрович, НИУ «МЭИ». Окончил бакалавриат кафедры «Вычислительные машины, системы и сети» НИУ «МЭИ» в 2023 году. E-mail: serzh_m@inbox.ru.

Баннов Андрей Евгеньевич, НИУ «МЭИ». Окончил бакалавриат кафедры «Радиотехника и электроника» НИУ «МЭИ» в 2023 году. E-mail: Andrewbannov1002@gmail.com.

ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА И СКОРОСТИ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОГЛАСНО УРАВНЕНИЮ МОНТЗИНГЕРА И ЗАКОНУ АРРЕНИУСА

Синица М.К., АО «СО ЕЭС», СамГТУ, г. Самара, Россия

Хренников А.Ю., АО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва, Россия

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются несколько методов оценки скорости старения изоляции трансформаторов. Проведено сравнение этих методов. На основе анализа был определен оптимальный метод оценки, позволяющий существенно снизить скорость старения в области критических температур, тем самым существенно увеличить срок службы трансформаторов.*

***Ключевые слова:** трансформатор, правило Монтзингера, закон Аррениуса, старение изоляции.*

Проблема ухудшения изоляции обмоток трансформаторов наиболее актуальна для трансформаторов высшего класса напряжения 35, 110 кВ и выше. Это связано с большим количеством трансформаторов, работающих в распределительной сети, и условиями их эксплуатации. Деградация параметров изоляции в основном связана с систематическими перегрузками, трудностями в регулярном проведении технических осмотров оборудования и длительностью эксплуатации. Рассмотрение данного вопроса связано с целесообразностью использования того или иного метода контроля срока службы трансформаторов.

Для расчета скорости деструкции изоляции можно использовать:

1. Правило Вант-Гоффа (при увеличении температуры химической реакции на 10 градусов скорость химической реакции

Секция 1

увеличивается в 2–4 раза. Однако правило действует лишь в очень ограниченном диапазоне температур) [1].

2. Уравнение Монтзингера (при повышении температура на 6 градусов, скорость старения (деградации) изоляции увеличивается в 2 раза). Принято для диапазона температур 80–140 °С для изоляции класса А (табл. 1) [2].

3. Уравнение Аррениуса (при прочих равных условиях скорость химической реакции в газовой фазе зависит от температуры и энергии активации реакции).

4. ТАС (теория активных соударения) или ТАК (теория активированного комплекса). В данном материале не рассматривается.

Таблица 1

Коэффициент старения изоляции от температуры наиболее нагретой точки

Θ_n	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
V	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16	32	64	128

Уравнение Монтзингера

Основным инструментом определения скорости старения изоляции является применение уравнения Монтзингера. Для применения уравнения Монтзингера необходимо, на первом этапе, определиться с температурой наиболее нагретой точки трансформатора. Температура наиболее нагретой точки определяется как:

$$\Theta_{\text{ннт},t} = \Theta_{\text{охл}} + v_{\text{м},t} + v_{\text{ннт},\text{м},t},$$

где $\Theta_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей среды;

$v_{\text{м},t}$ – превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды;

$v_{\text{ннт},\text{м},t}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях [3].

Коэффициент старения изоляции же определяется как:

$$V = 2^{\frac{(\Theta_{\text{ннт},t} - 98)}{6}},$$

где V – коэффициент скорости старения изоляции;

$\Theta_{\text{ннт},t}$ – температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора.

Коэффициент 1 установлен для температуры +98°C (табл. 1). Методика определения срока службы трансформатора по этому критерию установлена [4].

Коэффициент 1,0 в табл.1 для температуры 98°C объясняется тем, что при дальнейшем повышении температуры происходит вскипание растворённой в масле воды с образованием пузырьков, что ухудшает условия охлаждения обмоток.

Правило Аррениуса

Вторым методом учёта старения (деструкции) целлюлозной изоляции является метод с применением теории Аррениуса (применяется, в частности, для контроля времени эксплуатации трансформаторного оборудования компании Alstom):

$$k(T) = A \cdot e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)},$$

где $k(T)$ – константа скорости реакции;

A – предэкспоненциальный множитель, показывающий общее число столкновений молекул (не зависит от температуры)

T – температура, К;

E_a – энергия активации, Дж/моль;

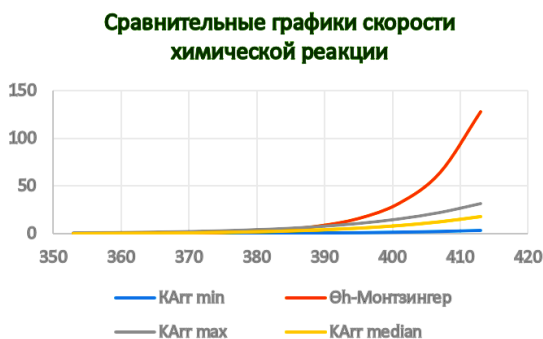
R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К [5].

При рассмотрении вопроса применения уравнения Аррениуса предполагается, что все химические реакции разложения происходят в газовой фазе (на границе сред в тонком слое между трансформаторным маслом и твердой изоляцией обмотки).

Основу масла составляют нефтены (C_nH_{2n}) и парафины (C_nH_{2n+2}), не имеющие в своем химическом составе атомов кислорода [6]. В этом случае свободный кислород присутствует в растворенном виде, что неизбежно находится в составе масла (полностью удалить кислород невозможно). Поэтому основу образующихся воды и углекислого газа должны составлять продукты пиролиза целлюлозы. В этом случае представляется более целесообразным использование уравнения Аррениуса, учитывающего термохимические процессы. В то же время, учитывая энергию активации целлюлозы, количественные значения коэффициентов скорости реакции оказываются ниже, чем установленные по уравнению Монтзингера (рисунок).

Секция 1

На основании рассчитанных графиков можно предположить, что использование теории Аррениуса приводит к снижению скорости старения изоляции и смягчению температурно-зависимых условий эксплуатации трансформаторов по сравнению с методиками, использующими уравнение Монтзингера в области критических температур. В рабочем диапазоне температур (примерно до 110°C) коэффициенты скорости реакции отличаются незначительно (табл. 2).



Сравнительные графики коэффициентов скорости старения изоляции

Таблица 2

Медианное значения коэффициента скорости реакции по Аррениусу в сравнении с коэффициентом скорости реакции по Монтзингеру

$t, ^\circ\text{C}$	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
k_{0Am}	0,29	0,46	0,73	1,13	1,74	2,64	3,94	5,82	8,49	12,25	17,5
k_{0M}	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128

Выводы

Рассмотренные формулы для расчета скорости старения изоляции обмоток трансформаторов является универсальным инструментом и используется в математических моделях комплексной оценки состояния трансформаторов. Теория Аррениуса дает меньшие значения скорости старения с ростом температуры. При температуре 98°C коэффициенту 1 по уравнению Монтзингера соответствует 1,134 по теории Аррениуса. Однако, с ростом температуры коэффициент по теории Аррениуса растет

медленнее. В диапазоне критических температур уравнение Аррениуса является предпочтительным, в связи с меньшим влиянием температуры на старение изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы химической кинетики. Учебное пособие. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Москва, МАДИ, 2016. – 68 с.

2. М.А. Смирнов, Т.Е. Касаткина, Г.П. Гусева, «Дефекты в маслонаполненных силовых трансформаторах, вызывающие разложение электрической изоляции с выделением газообразных продуктов».

3. Бузаев В.В. О необходимости единой системы физико-химической диагностики изоляции оборудования трансформаторных подстанций / В.В. Бузаев, Л.А. Дарьян, Ю.М. Сапожников и др. // Энергетик. 2004. № 11. С. 9–12.

4. ГОСТ 14209-85 «Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки».

5. Хренников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Александров Н.М. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие для магистров. Москва, Издательство: Директ-Медиа, 2022, 335 с.

6. С.Д. Лизунов Сушка и дегазация изоляции трансформаторов высокого напряжения. Москва, М-114, Издательство «Энергия», 1971 г.

Авторы:

Синица Марк Константинович, аспирант СамГТУ, специалист I категории отдела краткосрочного планирования Службы краткосрочного и оперативного планирования режимов. Окончил Самарский государственный технический университет в 2021 году по специальности Электроэнергетика и электротехника. В том же году поступил в аспирантуру по специальности Электро- и теплотехника. E-mail: sinitsa-mk@yandex.ru.

Хренников Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС – начальник отдела НТС и НТИ, АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети. Окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1986 году, кандидат технических наук с 1997 года. Докторскую диссертацию по теме «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования» защитил в 2009 году. E-mail: ak2390@inbox.ru. E-mail: ak2390@inbox.ru.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРЯМЫМИ МЕТОДАМИ

Бабакин А.И., Васильев А.Е., Картузова Т.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В данной работе представлены различные методы расчета установившихся режимов в электрических системах. Особое внимание уделяется узловым уравнениям, которые имеют широкое применение благодаря их простоте формирования и возможностям эффективного решения. Метод Гаусса выступает в качестве основы для всех прямых методов решения линейных алгебраических уравнений, связанных с установившимся режимом в электрических системах.*

***Ключевые слова:** метод Гаусса, схема Жордана, метод Крамера.*

В линейной электрической цепи в установившемся режиме основной задачей является определение таких параметров как: ток в ветвях, напряжений в узловых точках, мощности. Данные параметры можно определить тремя способами:

1. получение решения обобщенного уравнения;
2. решение системы узловых напряжений;
3. решение контурных уравнений.

Обобщенное уравнение состояния электрической цепи имеет следующий вид:

$$A \cdot I = F,$$

где $A = \begin{pmatrix} M \\ NZ \end{pmatrix}$ – матрица параметров схемы замещения,

$F = \begin{pmatrix} J \\ E \end{pmatrix}$ – матрица исходных параметров режима.

Матрица M содержит информацию о конфигурации соответствующей ей схеме. Матрица N вычисляется следующим образом: $N = -M_{\beta t} \cdot M_{\alpha t}^{-1}$.

Система узловых напряжений

Матричное узловое уравнение имеет вид:

$$Y \cdot U_{\Delta} = J - M \cdot Y_a \cdot A, \quad (1)$$

где $Y = M \cdot Y_a \cdot M_t$ – матрица узловых проводимостей, Y_a – матрица проводимости ветвей, определяется по исходной матрице

Секция 1

Z_a , $U_\Delta = U_i - U_0$ – матрица напряжений узлов относительно базисного.

Решив матричное узловое уравнение относительно U_Δ можно найти и токи в ветвях: $I = Z_a^{-1} \cdot (M_t U_\Delta + E)$.

Матричное контурное уравнение

Матричное контурное уравнение имеет вид:

$$Z_b I_b = E_b - N Z_a \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} J, \quad (2)$$

где $Z_\alpha = N Z_a N_t$ – матрица контурных сопротивлений, I_b – контурный ток, M_α – матрица соединений в узлах дерева, N – матрица соединений в узлах контура.

Алгоритм метода Гаусса с обратным ходом.

1. Прямой ход: начинается с преобразования исходной матрицы коэффициентов системы уравнений к верхнетреугольному виду путем вычитания из строк других строк, умноженных на коэффициенты. Этот процесс продолжается до тех пор, пока матрица не примет верхнетреугольный вид.

2. Обратный ход: после того как матрица будет приведена к верхнетреугольному виду, происходит обратный процесс выражения неизвестных начиная с последнего уравнения и последовательной подстановки полученных значений в предыдущие уравнения.

Алгоритм метода Гаусса без обратного хода (схема Жордана).

1. Прямой ход: также начинается с приведения исходной матрицы к верхнетреугольному виду без использования обратного хода. Однако в отличие от классического метода Гаусса здесь не происходит выражение неизвестных.

2. Схема Жордана: после приведения матрицы к верхнетреугольному виду, в случае схемы Жордана происходит дальнейшее преобразование матрицы для получения диагонального вида. Это позволяет найти значения неизвестных через полученную диагональную матрицу.

Для заданного варианта схемы, представленной на рис. 1, параметров сети и задающих нагрузок составить в матричной

Секция 1

форме: а) обобщенное уравнение состояния электрической цепи;
 б) узловое уравнение; с) контурное уравнение.

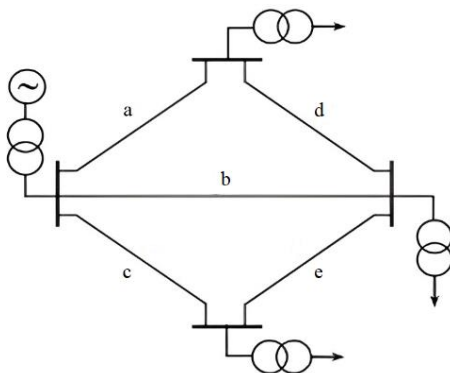


Рис. 1. Заданный вариант схемы

Сопротивление линий:

$$Z_a = 10 \text{ Ом}; \quad Z_b = 20 \text{ Ом}; \quad Z_c = 40 \text{ Ом}; \quad Z_d = 40 \text{ Ом};$$

$$Z_e = 20 \text{ Ом}.$$

Задающие токи: $J_1 = -2 \text{ А}; \quad J_2 = 4 \text{ А}; \quad J_3 = -4 \text{ А}.$

Составим соответствующий граф, представленный на рис. 2.

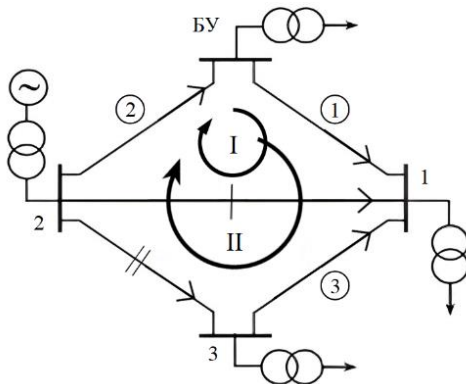


Рис. 2. Граф, соответствующий схеме на рис. 1

а) Запишем исходные данные, составим матрицы M и N .

Секция 1

$$Z_a = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$N = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad J = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \\ -4 \end{pmatrix}.$$

Определим $N Z_a N Z_\alpha$: $N Z_a = \begin{pmatrix} 10 & 20 & 0 & -40 & 0 \\ 10 & 20 & -40 & 0 & -20 \end{pmatrix}$.

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 2 & 0 & -4 & 0 \\ 1 & 2 & -4 & 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \\ -4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

б) Матричное узловое уравнение имеет вид (1). Необходимо определить матрицу $Y = M Y_\alpha M_t$.

Матричное узловое уравнение для заданной схемы имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 3/20 & -1/40 & -1/40 \\ -1/40 & 1/8 & -1/20 \\ -1/40 & -1/20 & 3/40 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{\Delta 1} \\ U_{\Delta 2} \\ U_{\Delta 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \\ -4 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

в) Матричное контурное уравнение имеет вид (2).

Определению подлежат матрицы Z_b и $M_\alpha^{-1} Z_e M_\alpha^{-1}$. Тогда контурное уравнение в матричной форме имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 70 & 30 \\ 30 & 90 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -140 \\ -300 \end{pmatrix}.$$

Далее рассмотрим различные способы решения данных уравнений. Обобщенное уравнение в матричной форме (3) решим методом Гаусса с обратным ходом. На рис. 3 представлен программный код для ввода элементов матрицы и расчета ее коэффициентов на шаге k . Здесь пользователю предлагается выбрать число строк и столбцов матрицы, затем заполнить ее

Секция 1

произвольными значениями. После чего программа выводит на экран созданную пользователем таблицу, а также результаты ее пересчета на шаге k .

```
1 N = int(input("Введите количество строк: "))
2 M = int(input("Введите количество столбцов: "))
3 A = []
4 for i in range(N):
5     A.append([0]*M)
6 for i in range(N):
7     for j in range(M):
8         A[i][j] = float(input("Введите элемент: "))
9 print("Введенная матрица:")
10 for i in range(N):
11     for j in range(M):
12         print('{0:8}'.format(A[i][j]),end=" ")
13     print()
14 for k in range(N):
15     for j in range(k+1,M):
16         A[k][j]=A[k][j]/A[k][k]
17     A[k][k]=1
18 for i in range(N):
19     if i!=k:
20         for j in range(k+1,M):
21             A[i][j]=A[i][j]-A[i][k]*A[k][j]
22         A[i][k]=0
23 print("Матрица на шаге {}:".format(k+1))
24 for i in range(N):
25     for j in range(M):
26         print('{0:8}'.format(A[i][j]),end=" ")
27     print()
```

Рис. 3. Программный код для ввода элементов матрицы и расчета ее коэффициентов на шаге k

В результате пяти шагов система уравнений приведена к треугольному виду. Найдем значения токов в ветвях:

$$I_{at} = \left(\frac{20}{9}; \frac{2}{9}; -\frac{8}{9}; \frac{2}{3}; \frac{28}{9} \right).$$

При решении системы узлового уравнения методом Гаусса с обратным ходом также приведем только результаты преобразований на соответствующих шагах.

Исходное узловое уравнение в матричной форме представлено в виде (4). В результате двух шагов систему уравнений приводится к треугольному виду, поэтому можно выполнить расчет обратного хода:

$$U_{\Delta 1} = -57, (7), \quad U_{\Delta 2} = 4, (4), \quad U_{\Delta 3} = -22, (2).$$

Токи в ветвях схемы определяются произведением матриц: $I_a = Z_a^{-1} \cdot M_t \cdot U_a$. Сопоставление результатов токов в ветвях указывает на верность выполнения решения узлового уравнения.

Решим систему узлового уравнения методом Гаусса без обратного хода.

Результаты третьего шага представим в виде матрицы:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{\Delta 1} \\ U_{\Delta 2} \\ U_{\Delta 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -22, (2) \\ 4, (4) \\ -57, (7) \end{pmatrix}.$$

Сопоставив результаты $U_{\Delta i}$ $U_{\Delta i}$ с результатами, полученными на основе решения уравнения методом Гаусса с обратным ходом, видим, что они идентичны.

В электроэнергетике метод Гаусса [1] имеет большое практическое значение. Современные инженеры-энергетики должны хорошо владеть этим методом для решения различных задач в своей профессиональной сфере.

Метод Гаусса применим к любой системе линейных уравнений и особенно хорошо подходит для решения систем с большим количеством уравнений. Его использование в численных вычислениях на компьютерах особенно эффективно благодаря простоте и однотипности операций, которые выполняются.

ЛИТЕРАТУРА

Елисеева В.В., Картузова Т.В., Чернышев И.В. Применение преобразования Фурье к задачам электроэнергетики. – Математические модели и их приложения: сборник научных трудов. Том 1. Выпуск 12. Чебоксары, 2010, С. 363–370.

Авторы:

Картузова Татьяна Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и теоретической механики им. С.Ф. Сайкина ЧГУ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». E-mail: tanuyakartuzova@yandex.ru.

Бабакин Алексей Иванович, студент группы ЭЭ-21-22 факультета энергетики и электротехники.

Васильев Артемий Евгеньевич, студент группы ЭЭ-21-22 факультета энергетики и электротехники.

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОВОДА ИЛИ ГОЛОЛЁДА В СИСТЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Пантелеев В.И., Малеев А.В., Сибирский федеральный университет, Политехнический институт, г. Красноярск, Россия

***Аннотация.** В статье рассматривается система мониторинга гололедообразования с использованием технологии «машинного зрения». Разрабатывается адаптивный алгоритм обработки изображения, позволяющий получить значимые практические результаты выделения провода и гололеда в самых сложных погодных условиях. Производится проверка работы алгоритмов на тестовых изображениях, формируются выводы по результатам работы.*

***Ключевые слова:** линии электропередачи; интеллектуальные электрические сети; системы мониторинга гололедообразования; системы технического зрения; адаптивный алгоритм обработки изображения.*

Необходимость создания перспективных систем мониторинга и защита сетей от неблагоприятных внешних факторов, в том числе гололедно-ветровых воздействий, провисания проводов и т.п., является стратегической целью и одним из направлений развития Интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью [1].

Современный уровень технологий позволяет реализовать систему мониторинга гололедообразования, с возможностью автоматического определения толщины стенки гололеда на проводе воздушной линии электропередачи и скорости его нарастания, основанную на методологии «машинного зрения» [2].

В существующих системах «машинного зрения», ориентированных на выполнение прикладных задач, используются различные технологии и методы обработки изображений [3]. Общеизвестные приемы обработки изображений, широко применяемые в системах технического зрения, характеризуются приемлемыми практическими результатами выделения провода и гололеда [4], однако последние могут быть улучшены за счет создания новых алгоритмов обработки данных, учитывающих технологические свойства объектов электроэнергетики. К таким

Секция 1

свойствам относятся, например, характерные особенности подвески проводов воздушной линии электропередачи, способы фиксации проводов в поддерживающей арматуре, наличие изоляторов и т.п. Учет технологических признаков подвески проводов и грозозащитных тросов воздушной линии электропередачи существенно повышает качественные и количественные показатели системы мониторинга, в том числе и в условиях плохой видимости.

К технологическим признакам провода и(или) гололёда, которые возможно учесть при его обнаружении разработанным методом, с учетом особенности его визирования оптическим сенсором, в рассматриваемой системе мониторинга относятся:

- протяженность провода и(или) гололёда на всем изображении с учетом его «перегиба» в месте фиксации поддерживающей арматурой ЛЭП;
- наличие поддерживающей гирлянды или опорных изоляторов в зависимости от конструктивной особенности ЛЭП;
- изменение стрелы провеса провода в зависимости от температуры, протекающего тока, ветровых воздействий, текущих погодных условий;
- относительная однородность цветовых оттенков провода и(или) гололёда на изображении;
- пляска проводов при гололёде и т.п.

Следует отметить, что цветовые оттенки провода и гололёда на изображении могут быть неоднородными и отличаться не только от марки используемого провода, но и от времени года и суток, а также текущей погодной обстановки.

Авторами предложен новый метод автоматического распознавания провода и гололёда на нем, учитывающий специфику формирования изображения при размещении системы мониторинга на опоре линии электропередачи. Также, на основании предложенного метода, разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме выделять провод и/или гололёд на изображении с определением их основных параметров.

Автоматизация определения технологических параметров провода и гололёда сокращает объем передаваемой информации, разгружает диспетчерский персонал от дополнительной

Секция 1

работы по расшифровке изображений. Упрощенная блок-схема одного из возможных вариантов программной реализации разработанного метода выделения провода и гололёда с определением основных технологических параметров представлена на рис. 1.

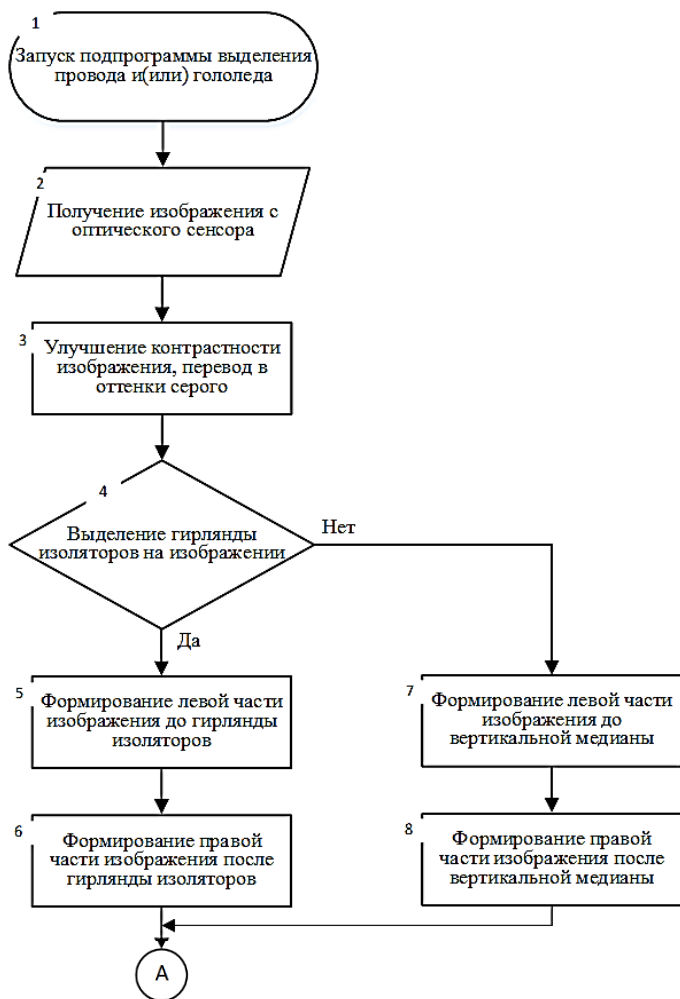


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма выделения провода и гололёда (начало)

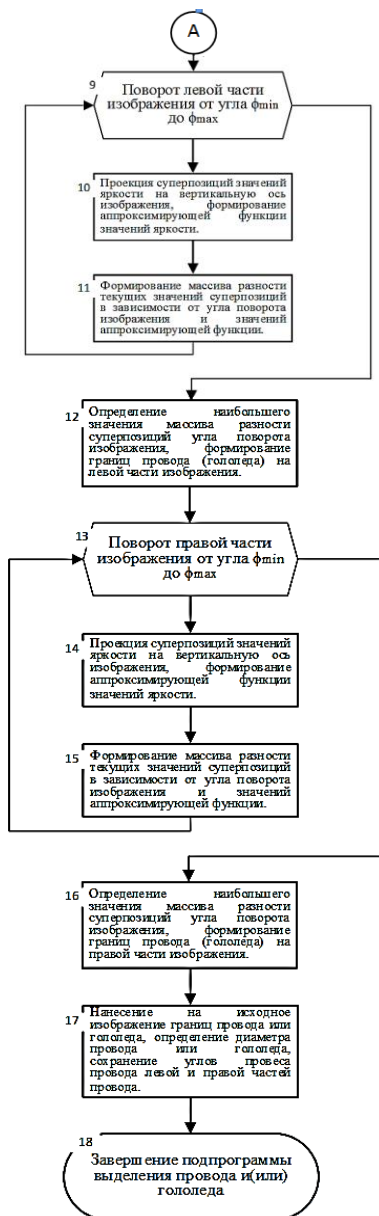


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма выделения провода и гололеда (окончание)

Секция 1

Процессу основной обработки изображения, в рассматриваемой системе мониторинга гололёдообразования, предшествует этап предварительного формирования изображения с камеры технического зрения, расположенной на опоре линии электропередачи. Изображение с камеры технического зрения статично и соответствует изображению, представленному на рис. 2.



Рис. 2. Изображение провода и поддерживающей арматуры промежуточной опоры ЛЭП 220 кВ

Важным моментом является выделение изоляторов на изображении (рис. 3). Гирлянда изоляторов по сути является блоком в механической системе подвеса провода и точкой начала координат, относительно которой можно рассматривать углы провеса провода как до этой точки, так и после неё. Углы провеса провода до и после места крепления провода в поддерживающей арматуре в общем случае не равны и зависят от величин пролета и положения опор на трассе прохождения линии электропередачи.

Методы выделения контуров на изображении, которые также формируют контуры изоляторов, рассмотрены в [4]. Стекланые изоляторы, используемые в качестве изолирующей арматуры, унифицированы для линий электропередачи с номинальным напряжением 35÷500 кВ. Корреляционная обработка

Секция 1

позволяет выявить на изображении гирлянду изоляторов путем сравнения эталонного изображения изолятора, хранящегося в памяти системы мониторинга, с текущим изображением, полученным с камеры технического зрения. Таким образом на текущем изображении провода или гололёда выделяется определенная область с поддерживающей гирляндой изоляторов.



Рис. 3. Графическая интерпретация результатов работы подпрограммы выделения изоляторов на изображении

Подпрограмма поиска изоляторов с помощью корреляционной обработки выделяет замкнутые области на изображении с одновременной проверкой соответствия замкнутых областей «эллипсоидной» форме. В результате формируется однородная структура на изображении, для которой рассчитываются центр массы и наклон тела фигуры относительно этого центра (рис. 3).

Если гирлянду изоляторов на изображении выделить не удаётся, например, для стержневых типов изоляторов ЛЭП 0,38 ÷ 10 кВ, изоляторов с «налипшим» льдом, снегом или выделяется несколько элементов, расположенных случайным образом, то подпрограмма выделения изоляторов формирует левые и правые части изображений из исходного, поделив последнее вертикально пополам (рис. 4).

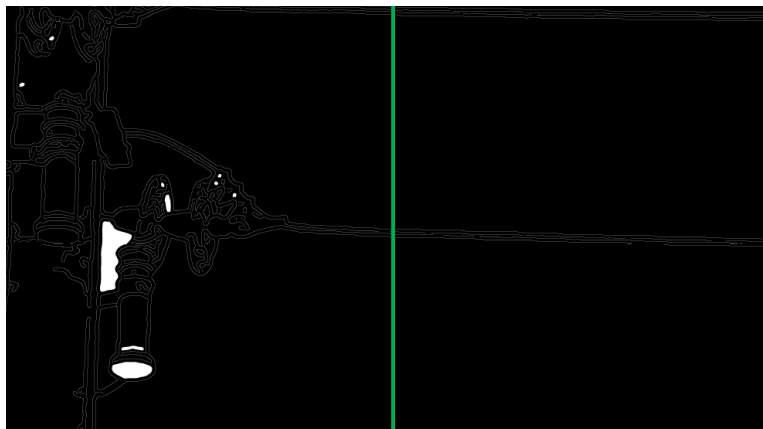


Рис. 4. Графическая интерпретация результатов работы подпрограммы выделения изоляторов при отрицательном выделении контура изоляторов

После положительного или отрицательного результата выделения гирлянды изоляторов, подпрограмма выделения провода на «левой» части изображения реализует циклический процесс поворота изображения и сохранения проекций суперпозиций значений яркости на вертикальную ось (рис. 5). Процесс поворота изображения и его проецирование включают в себя циклические аффинные преобразования исходного изображения, адаптированные для решения поставленной задачи, математическое описание которых может быть сформировано общеизвестными выражениями, рассмотренные в соответствующей литературе [5].

Следует отметить, что распознавание провода или гололёда на изображении, выделение их на общем фоне является довольно сложной задачей. Априорная неопределенность оптической модели фона, а также сложная структура изображения провода или гололёда на этом фоне, также вносят серьезные трудности при их обнаружении. Алгоритм обработки изображений должен адаптироваться (приспосабливаться) к этим изменениям, безошибочно выделять ключевые технологические параметры элементов передачи электроэнергии в автоматическом режиме. Одним из способов решения задач обработки данных в условиях априорной неопределенности является применение адаптивных алгоритмов [6].

Секция 1

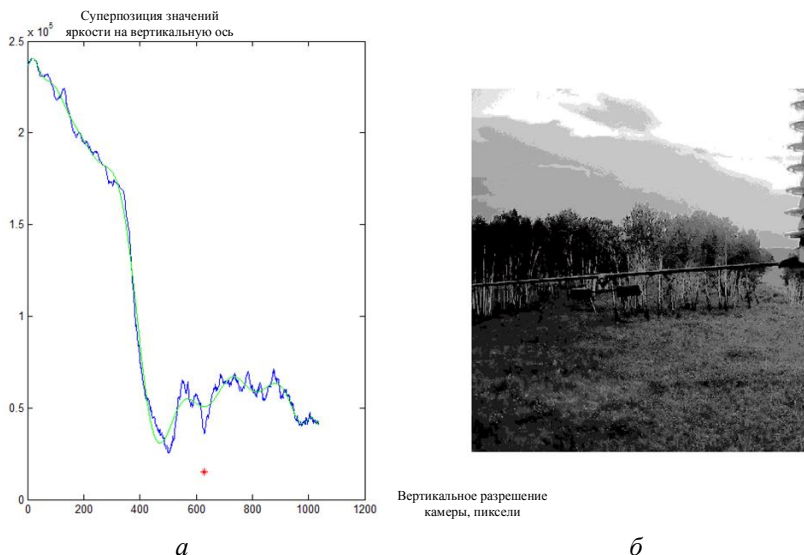


Рис. 5. Формирование изображения подпрограммой выделения провода: *а* – проецирование значений яркости на вертикальную ось (синяя линия), аппроксимирующая функция (зеленая линия); *б* – положение провода при текущем угле поворота

Разработка оптимального адаптивного алгоритма на практике сопряжено с огромными трудностями, поэтому при решении большинства инженерных задач реализуются квазиоптимальные алгоритмы, формирующие решающие правила, по возможности с меньшим проигрышем в качестве обработки исходных данных. Реализованный алгоритм обработки изображения провода или гололеда должен давать наилучший результат при всех возможных обрабатываемых данных (произвольный фон и случайная погодная обстановка в месте наблюдения), поэтому необходима некоторая процедура адаптации, составляющая вместе с процедурой обработки адаптивный алгоритм, оптимизирующий аппроксимирующую функцию проекций суперпозиций значений яркости на вертикальную составляющую оси.

Нахождение аппроксимирующей функции для значений яркости (рис. 5, *а*), предшествует процессу сравнения среднеквадратичного значения функции суперпозиции с последней, что

Секция 1

позволяет выделить однородно-распределенную структуру функции яркости провода или гололёда на изображении.

В результате циклического процесса поворота исходной части изображения, от максимального значения угла, соответствующего «лежащему» на земле проводу, до угла провеса провода в нормальном технологическом режиме, из результатов сравнения разности среднеквадратичного значения функции суперпозиции и значений аппроксимирующей функции, формируется массив проекций яркостей на вертикальную ось, максимальное значение которого, является нормалью к горизонтальной плоскости и позволяет «выделить» провод или гололёд на изображении (рис. 6). Из данного рисунка видно, что значение яркости изображения, соответствующее проводу, многократно превышает уровень яркости общего фона, что свидетельствует о высокой избирательности разработанного алгоритма выделения провода и (или) гололёда на изображении.

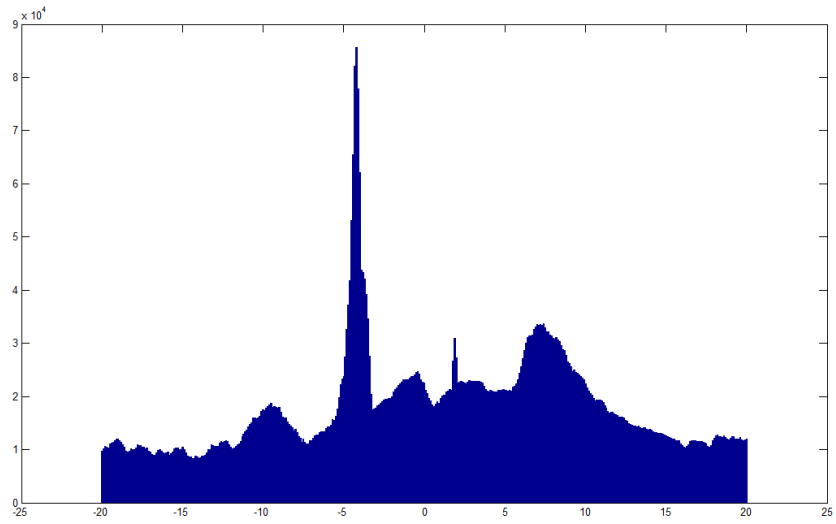


Рис. 6. Массив проекций яркостей на вертикальную ось, сформированный подпрограммой выделения провода горизонтальная ось – угол поворота исходного изображения, [град.], вертикальная ось – величина превышения яркости изображения провода к яркости общего фона [о.е.]

Секция 1

По результатам проведенных экспериментов вероятность правильного обнаружения провода и(или) гололёда может быть получена расчетным путем на основании определения эмпирической вероятности (экспериментально вычисляемая относительная частота) [7]:

$$P_n(A) = \frac{\mu(A)}{n},$$

где $P_n(A)$ – эмпирическая вероятность правильного определения провода или гололёда; n – число экспериментов; A – событие, соответствующее обнаружению провода или гололёда; $\mu(A)$ – количество успешных экспериментов.

Проведенные практические эксперименты подтвердили высокую эмпирическую вероятность правильного обнаружения провода или гололёда разработанной системой мониторинга гололёдообразования, которая составила более 95,8 %.

Результаты программного выделения провода или гололёда для нескольких тестовых изображений, с расчетом их основных технологических характеристик, представлены на рис. 7–9.

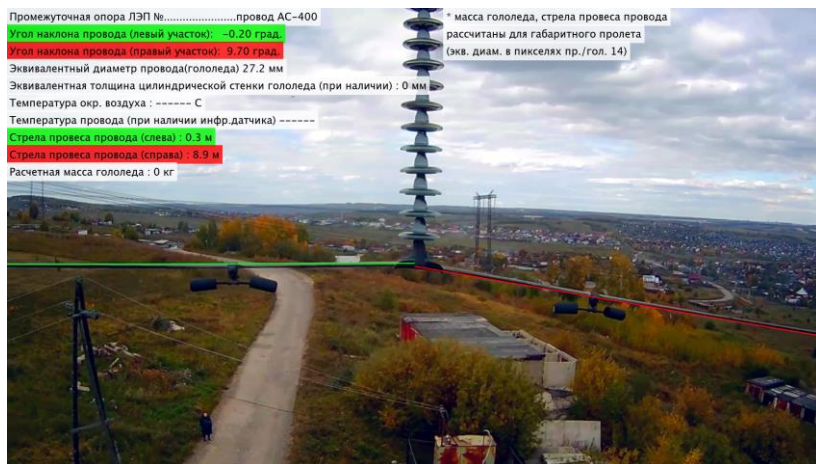


Рис. 7. Фотография анализируемого фрагмента провода линии 220 кВ с прикрепленной технологической информацией (ясная погода, хорошая видимость)

Секция 1

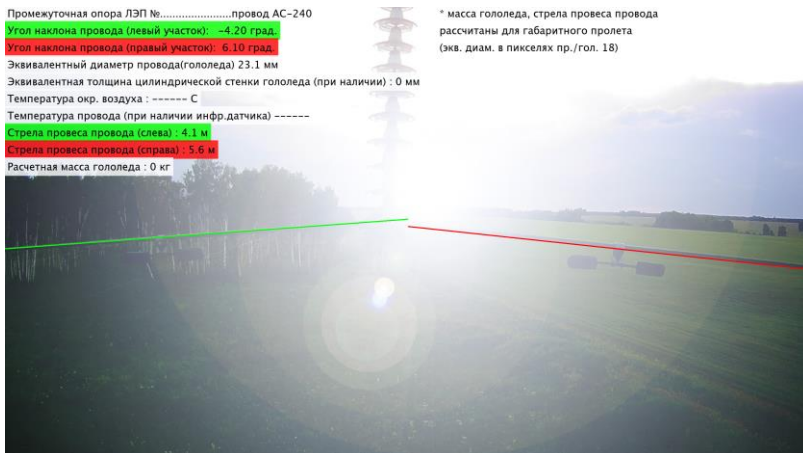


Рис. 8. Фотография анализируемого фрагмента провода линии 220 кВ с прикрепленной технологической информацией (ясная погода, «засветка» камеры прямыми лучами солнца)

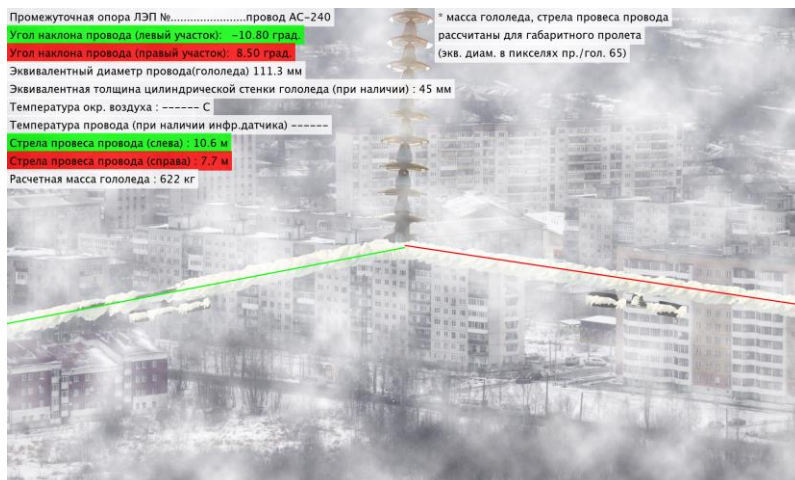


Рис. 9. Фотография анализируемого фрагмента провода с гололёдом (смешанные отложения и замерзший мокрый снег плотностью $0,2 \div 0,3$ г/см³) линии 220 кВ с прикрепленной технологической информацией (смена погоды, туман, дым)

Выводы

Предложенный адаптивный алгоритм выделения провода или гололёда по технологическим признакам, с учетом характерных особенностей размещения оптического сенсора, характеризуется высокими качественными показателями обнаружения в любой сложной метеорологической ситуации и окружающей фоновой обстановки вдоль трассы прохождения линии электропередачи.

Избирательность разработанного алгоритма идентификации провода или гололёда при его наличии, была проверена на тестовых изображениях макета линии электропередачи, а также на фотографиях, полученных с опор действующих воздушных линий разных классов номинальных напряжений. Провод и гололёд были выделены во всех случаях полностью, несмотря на сложную структуру общего фона на изображении, неоднородности макета провода и гололёда, при этом значение суперпозиции яркостей изображения, соответствующее проводу, многократно превышает уровень суммы яркостей пикселей общего фона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью: структура, методические принципы, система управления [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docplayer.ru/30547183-Intellektualnaya-elektroenergeticheskaya-sistema-s-aktivno-adaptivnoy-setyustruktura-metodicheskie-principy-sistema-upravleniya.html> (дата обращения: 28.03.2023).

2. Panteleev V. I., Maleev A. V. Monitoring of ice formation of overhead power line wires /Journal of Physics: Conference Series. Volume 1889, 2021. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)

3. Гридин В.Н., Титов В.С., Труфанов М.И. Адаптивные системы технического зрения, – СПб.: Наука, 2009. – 442 с.

4. Пантелеев В.И., Малеев А.В. Система мониторинга интенсивности гололёдообразования на проводах воздушной линии электропередачи // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 74–80.

5. Порев В.Н. Компьютерная графика. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 432 с.

6. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. Изд. 7-е, стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 479 с.

Авторы:

Пантелеев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетика». Сибирский федеральный университет, Политехнический институт. E-mail: VPanteev@sfu-kras.ru.

Малеев Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика». Сибирский федеральный университет, Политехнический институт. E-mail: AMaleev@sfu-kras.ru.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОЙ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ОБЩУЮ ЭНЕРГЕТИКУ

Кузьмин А.А., АНО «Соболевская Научная школа», г. Красноярск, Россия

Ефимов В.В., ПАО «Россети Сибирь», г. Красноярск, Россия

Аннотация. Цель статьи – исследование особенностей процессов цифровой интеграции систем альтернативных источников энергии в общую энергетику. Показано, что цифровые технологии позволяют решать проблемы, связанные с непредсказуемостью и неравномерностью производства энергии из альтернативных источников и обеспечивать стабильное и надежное энергоснабжение. Цифровые технологии позволяют усовершенствовать энергоэффективность восстановительных систем. В целом, цифровизация альтернативных источников энергии способствует улучшению эффективности, надежности и интеграции с электрическими сетями, что способствует устойчивому развитию и уменьшению зависимости от традиционных источников энергии.

Ключевые слова: цифровизация, процессы, интеграция, альтернативные источники энергии, общая энергетика

Введение

Цифровизация в энергетическом секторе следует общим тенденциям технологического развития. Темпы проникновения циф-

ровых технологий в последние годы существенно ускорились, что способствует возникновению новых моделей взаимоотношений на энергетических рынках, трансформации многих традиционных бизнес-моделей и появлению новых видов бизнесов в сфере обеспечения потребностей потребителей в энергии и услугах [1]. Для участников энергетического рынка цифровые инструменты и платформы обеспечивают более эффективную интеграцию различных источников энергии и типов потребителей, способствуя лучшему удовлетворению потребностей потребителей и надежности функционирования систем энергообеспечения. В то же время, цифровизация создает новые возможности для бизнеса и источники дохода для поставщиков энергетических услуг, помогая потребителям лучше понимать свое потребление энергии и уменьшать свои счета. В то же время использование современных возможностей различных цифровых платформ для обработки информации является своеобразным технологическим переходом к новому качеству жизнедеятельности общества [2].

Весьма актуальным направлением процессов цифровизации в энергетике связана с обеспечением эффективной интеграции систем альтернативных источников энергии в общую энергетическую систему. Данное направление обеспечивает эффективную интеграцию систем малой и микрогенерации альтернативных источников энергии в общую энергетическую систему.

Цель статьи – исследовать особенности процессов цифровизации интеграции систем альтернативных источников энергии в общую энергетическую систему.

Материалы и методы

Материалом исследования служат особенности процессов внедрения систем цифрового сопровождения интеграции систем малой и микрогенерации альтернативных источников энергии в общую энергетическую систему. Используются методы обобщения, систематизации и анализа научных данных по проблематике процессов цифровизации интеграции систем альтернативных источников энергии в общую энергетическую систему.

Результаты и их обсуждение

Основная цель цифровизации – преобразовать традиционные процессы и системы, в более эффективные, быстрые, гиб-

кие и интегрированные с помощью цифровых инструментов. Интеграция альтернативных источников энергии в электрическую сеть требует оптимизации работы системы, в связи с нестабильной солнечной и ветровой активностью. Использование различных типов энергоносителей для удовлетворения спроса потребителя в энергии повышает эффективность использования ресурсов. Цифровые технологии позволяют автоматизировать множество процессов, как следствие это приводит к повышению производительности и эффективности систем в целом. Они позволяют быстрее обрабатывать и передавать информацию, уменьшая время и затраты, необходимые для выполнения широкого спектра задач.

Цифровые технологии стимулируют появление и применение инновационных решений в различных областях. Они предоставляют новые возможности для создания и внедрения новых продуктов, услуг и бизнес-моделей. Цифровые инструменты, такие как искусственный интеллект, блокчейн и Интернет вещей, открывают новые перспективы для развития общества. Они позволяют совершать операции в режиме реального времени, получать доступ к данным и ресурсам из любого места и в любое время. Цифровая революция может снизить цифровой разрыв и помочь обеспечить равные условия для всех. Цифровые технологии напрямую способствуют сохранению ресурсов и уменьшению влияния на окружающую среду. К примеру, электронная документация и безбумажное управление, позволит уменьшить потребление бумаги. Использование энергоэффективных технологий и удаленного сотрудничества, способствует снижению выбросов парниковых газов. Внедрение технологии в повседневную жизнь человека, поможет улучшить качество жизни людей во многих аспектах. Они могут сделать более доступным образование, здравоохранение, финансовые услуги и другие сферы. Кроме того, они могут обеспечить удобство и комфорт, например через интеллектуальные устройства и системы "умных домов". Цифровизация является неотъемлемой частью современного развития общества. Она имеет потенциал изменить экономику, политику, культуру и жизнь людей в целом. Цифровизация способствует повышению эффективности, стимулирует инновации, облегчает коммуникацию и улучшает

доступ к информации. Процесс цифровизации влияет на разные сферы жизни и оказывает значительное влияние на развитие общества, что предоставляет ему новые возможности и делает его более конкурентоспособным в глобальном контексте [3].

Энергетические компании мира, лидеры по применению цифровых технологий, направляют значительные ресурсы на инновации, разумное оборудование и развертывание умных электрических сетей. К примеру, компания Enel запустила Network Digital Twin, цифровую платформу, которая создает современные и точные виртуальные копии физических сетей электроснабжения и их компонентов, а также системной динамики, позволяющей улучшить работу и проектирование сети, интегрировать распределенные энергетические ресурсы и управление рабочими процессами. В общем случае это качество связывается с проникновением на уровень практического применения технологий искусственного интеллекта (Artificial intelligence) [4].

Интеграция системы управления сетью с датчиками, инструментами анализа данных, системами хранения энергии, платформами управления энергией и другими типами энергетических технологий создает новые возможности. Это способствует распространению использования разумного оборудования (промышленного и бытового оборудования (IoT) с возможностью автоматического обмена информацией и управления с помощью цифровых технологий) и разумных систем измерения (Smart meters), которые получают все большее распространение. Например, в США уровень проникновения таких счетчиков достиг почти 50 % еще в 2016 году.

Микросети становятся популярными, поскольку они могут обеспечить энергетическую безопасность при чрезвычайных ситуациях (в случае нарушения работы общей энергосистемы) и могут легче, чем традиционные энергетические сети, интегрировать нестабильные альтернативные источники энергии в энергетическую сеть. ИИ одновременно обеспечивает эффективную интеграцию таких имеющихся децентрализованных местных ресурсов (distributed energy resources - DER), как электромобили (путем использования накопленной энергии в аккумуляторах в пиковые часы потребления или накопления энергии в аккумуля-

Секция 1

торах автомобилей при избытке энергии в микросети), тепловые насосы и солнечные фотоэлектрические в общую сеть энергоснабжения.

Блокчейн является децентрализованным (распределенным) публичным (открытым) цифровым реестром, который фиксирует и сохраняет любые транзакции ценностей: деньги, товары, имущество, работа или голоса. Это также взаимосвязанный и постоянно расширяющийся список записей, которые надежно хранятся в одноранговой сети. Каждый участник с доступом может одновременно просматривать информацию без всякой точки сбоя, создавая доверие к системе в целом. В энергетике блокчейн – это базовые цифровые платформы, позволяющие строить автоматические децентрализованные системы (комплексы) учета.

Таким образом, технология blockchain позволяет реализовать разумные контракты (Smart Contracts, выполняемые автоматически по установленному алгоритму), которые можно использовать для фиксации сделок купли-продажи энергии многих участников без посредника, для лучшего управления энергосистемами и интеграции большей доли альтернативных источников энергии.

Установка программного обеспечения блокчейн с интегрированными смартконтрактами (Smart-contracts) в сочетании с технологией смарт-счетчиков (Smartmeters) позволяет отслеживать и верифицировать источники энергии, осуществлять прямую (непосредственную) торговлю энергией (peer-to-peer trading), лучше балансировать и оптимизировать погрузку и спрос. Транзакции можно безопасно и автоматически записывать с помощью смарт-контрактов на блокчейне, устанавливающих прозрачный процесс, которому пользователи могут доверять, но с лучшей защитой от кибератак и без раскрытия личной информации.

Virtual power lines (VPLs) (Виртуальные линии передачи данных). VPL обеспечивают широкомасштабную интеграцию солнечной и ветровой энергии без перегрузки сети или перераспределения, позволяют избежать потребности в крупных инвестициях в развитие сетей из-за необходимости присоединения альтернативных источников энергии. VPL состоят из систем накопления энергии местной снабженческой компании, под-

ключенных к сети в двух ключевых точках: одна на стороне предложения, сохраняющая излишки генерации из альтернативных источников, которые не могли быть переданы из-за перегрузки сети; другая на стороне спроса, заряжается, когда разрешает мощность сети, а затем разряжается, когда это необходимо.

Energy Storage (накопители энергии, аккумуляторные батареи) – это технологии, которые могут накапливать избыток энергии в сети / производителе в один момент времени и возвращать ее в сеть / потребитель в другой. Технологии помогают выравнивать график нагрузки системы и создавать лучшие условия интеграции альтернативных источников энергии в систему.

Технология машинного обучения позволяет немецкому оператору передачи 50Hertz предусмотреть потери в сети на день вперед. В 2018 году 50 Hertz потратил 70 млн. евро на приобретение электроэнергии для покрытия потерь (2.5 ТВт·ч). Введенная оператором модель на основе нейронной сети способна уменьшить затраты до 1 % (700 тыс. евро). Каждые 15 минут собираются данные об интеграции ветровой и солнечной энергии, а также силе ветра, уровне инсоляции и температуре в 70 разных местах сети – это формирует основу, на которой нейронная сеть учится прогнозировать выработку и потери сети.

Аккумуляция энергии и построение равномерного графика производства и потребления энергии является наиболее эффективным режимом работы системы энергообеспечения, что, однако, трудно обеспечить в реальных условиях без применения ИИ. Развитие новейших аккумуляторных технологий является существенным изменением условий функционирования энергосистем, поскольку их можно интегрировать в энергетическую сеть и обеспечить выравнивание графика.

Кроме этого, системы накопления энергии в виде крупномасштабных батарей, агрегированных малых батарей («по счетчику») или подключенных электромобилей становятся ключевыми факторами для интеграции альтернативных источников энергии. ИИ может помочь эффективнее управлять этими технологиями, максимизируя интеграцию электростанций на базе альтернативных источников энергии, минимизируя цены на потребляемую на месте электроэнергию и максимизируя отдачу для владельцев системы хранения. Таким образом, управляемые

ИИ системы аккумулирования энергии позволяют выравнять график нагрузки системы и помогают снизить потребность энергетических компаний в строительстве новых электростанций. Ожидается, что к 2030 году мировой рынок хранения энергии вырастет в 20 раз, что лишь усугубит потребность в использовании технологий ИИ.

Интегрированная энергетическая инфраструктура, основанная на распределенной генерации электроэнергии (ветровая, солнечная, гидроэнергия), формирует локальные мини-сети, мощность от которой может варьироваться от киловатт (кВт) до более 100 мегаватт (МВт). Хотя обычно они автономны, они могут подключаться к основной сети.

В частности, необходимо обеспечить разработку соответствующего нормативно правового и технического обеспечения развития «умных сетей» для облегчения интеграции распределенных источников энергии с использованием накопителей энергии, создания платформы управления мощностью интегрированных распределенных источников энергии, обеспечения реализации международных стандартов функциональной совместимости оборудования интеллектуальных сетей.

Выводы

Цифровые технологии способствуют интеграции альтернативной энергии с традиционными электрическими сетями. Они позволяют решать проблемы, связанные с непредсказуемостью и неравномерностью производства энергии из альтернативных источников и обеспечивать стабильное и надежное энергоснабжение. Цифровые технологии позволяют усовершенствовать энергоэффективность восстановительных систем. К примеру, использование «умных» сенсоров и систем управления может помочь снизить потребление энергии и оптимизировать производство. Данные технологии позволяют удаленно мониторить и обслуживать альтернативные источники энергии. Это обеспечивает более эффективное управление, снижение затрат на обслуживание и сокращение времени простоя оборудования. В целом, цифровизация альтернативных источников энергии способствует улучшению эффективности, надежности и интеграции с электрическими сетями, что способствует устойчивому развитию и

уменьшению зависимости от традиционных источников энергии. Необходимо отметить тот факт, что благодаря цифровизации мощность солнечных панелей растет и увеличивается энергоэффективность, а уменьшается оплата электроэнергии. Для того чтобы убедиться в альтернативности обычной электроэнергии, следует провести исследование стоимости обеспечения электроэнергией завода по производству пеллет через обычное использование электроэнергии и использование солнечных панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Никитаева А.Ю., Подгайнов Д.В.* Цифровая трансформация и переход к альтернативным источникам энергии как приоритетные векторы развития энергетики // Вестник Академии знаний. 2021. № 6. (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-i-perehod-k-alternativnym-istochnikam-energii-kak-prioritetnye-vektory-razvitiya-energetiki> (дата обращения: 31.10.2023).

2. *Туровец Ю., Проскуракова Л., Стародубцева А., Бьянко В.* «Зеленая» цифровая трансформация в электроэнергетике // Форсайт. 2021. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenaya-tsifrovaya-transformatsiya-v-elektroenergetike> (дата обращения: 31.10.2023).

3. *Садунова А.Г.* Цифровые стратегии развития ветряной и солнечной энергетики юга России в контексте энергетического перехода // Инновации и инвестиции. 2021. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-strategii-razvitiya-vetryanoy-i-solnechnoy-energetiki-yuga-rossii-v-kontekste-energeticheskogo-perehoda> (дата обращения: 31.10.2023).

4. *Мозохин А.Е., Мозохин А.Е.* Анализ перспективного развития энергетических систем в условиях цифровой трансформации Российской экономики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnogo-razvitiya-energeticheskikh-sistem-v-usloviyah-tsifrovoy-transformatsii-rossiyskoy-ekonomiki> (дата обращения: 31.10.2023).

Авторы:

Кузьмин Алексей Александрович, директор АНО «Соболевская научная школа». E-mail: Kuzmin_A_A@211.ru.

Ефимов Владимир Васильевич, директор по закупкам ПАО «Россети Сибирь». E-mail: EWRussia@mail.ru.

ПОСТРОЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Костенко А.А., Курбатова Е.П., Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

***Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты моделирования электромагнитных процессов в турбогенераторе ТЗФ160 с использованием численного анализа. Построена трехмерная модель магнитной системы и произведена ее верификация на основе сравнения полученных при моделировании результатов с паспортными характеристиками машины и данными с реального турбогенератора.*

***Ключевые слова:** турбогенератор, численное моделирование, электромагнитное поле.*

Численное моделирование турбогенератора является перспективным способом для анализа и расчета параметров турбогенератора [1,2]. Оно может применяться для оценки технического состояния в различных режимах работы, в том числе аварийных. Кроме того результаты численного моделирования могут быть использованы для построения комплексных цифровых двойников турбогенераторов [3] или построения базы данных для интеллектуальных систем мониторинга, основанных на использовании нейронных сетей [4].

Модель турбогенератора

В качестве исследуемого объекта выбран турбогенератор ТЗФ160. Паспортные данные турбогенератора показаны в табл. 1. Турбогенераторы серии ТЗФ имеют непосредственное воздушное охлаждение обмотки ротора и сердечника статора. Косвенное воздушное охлаждение обмотки статора. Отличаются увеличенной надежностью и перегрузочной способностью, что достигается за счет разделения потоков воздуха, охлаждающих ротор и статор. Для уменьшения потерь в торцевых зонах в турбогенераторах этой серии используется скок крайних пакетов статора, что положительно сказывается на их состоянии при эксплуатации.

Для анализа электромагнитных процессов в турбогенераторе построена трехмерная модель магнитной системы ТЗФ-160 в

Секция 1

программном комплексе EasyMAG3D. Модель построена на основании конструкторской документации и паспортных данных турбогенератора. Внешний вид модели представлен на рис. 1.

Таблица 1
Паспортные данные турбогенератора ТЗФ-160

	Название столбца 2	Название столбца 3
Полная мощность	$S_{\text{НОМ}}$	188 МВА
Активная мощность, МВт	$P_{\text{НОМ}}$	160 МВт
Коэффициент мощности	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	0,85
Напряжение статора	$U_{\text{НОМ}}$	15,75 кВ
КПД	-	98,6 %
Ток статора	$I_{\text{СТНОМ}}$	6,9 кА
Ток возбуждения	$I_{\text{ВНОМ}}$	1,615
Частота вращения	$n_{\text{НОМ}}$	3000 об/мин

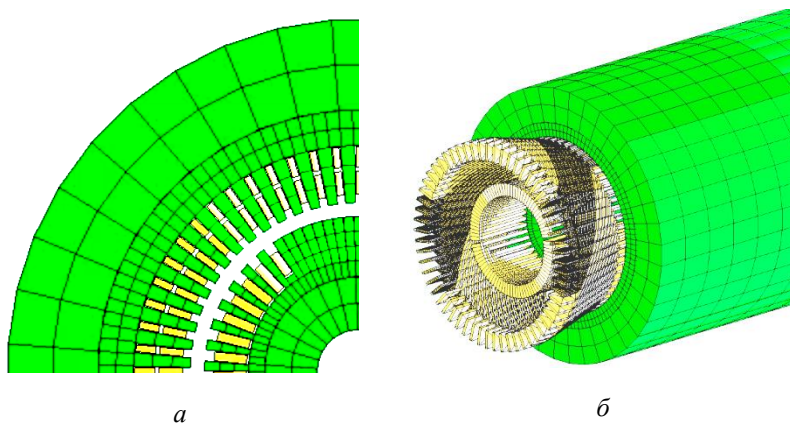


Рис. 1. Трехмерная модель магнитной системы турбогенератора ТЗФ-160: *a* – сечение магнитной системы (1/4); *б* – 3D вид

Модель ротора задается в виде геометрии магнитопровода с упрощенным представлением формы паза. Для ротора используется характеристика материала конструкционной стали с индукцией насыщения 1,8 Тл. В пазах ротора укладывается обмотка возбуждения, состоящая из пазовых и лобовых частей. Для

Секция 1

создания полюса на роторе используется 9 катушек. При расчетах обмотка возбуждения задается постоянной МДС.

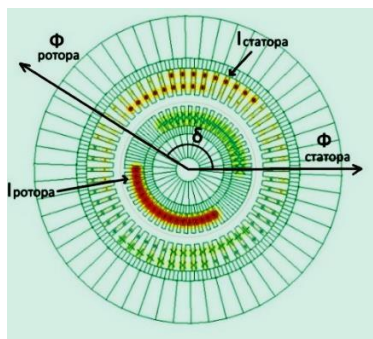
Модель статора представляет собой геометрию магнитопровода без учета шихтовки и разделения на пакеты, но с заданным скосом на торцах. Форма паза упрощена. В пазах статора размещена стержневая двухслойная обмотка якоря. Лобовые части обмотки заданы в соответствии с изогнутой по эвольвенте геометрией. Для статора использован материал электротехнической стали с индукцией насыщения 2 Тл.

Для расчета режимов работы турбогенератора при работе параллельно на сеть в модели задаются следующие параметры:

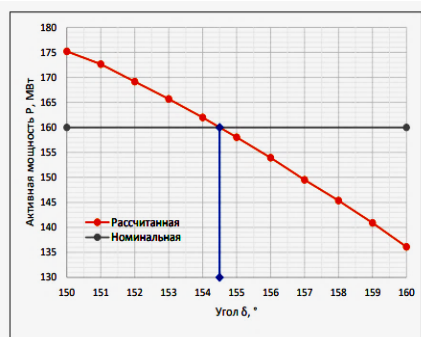
- постоянный ток возбуждения;
- трехфазная система токов с частотой сети;
- угол δ – угол между магнитными осями ротора и статора;
- синхронная скорость вращения ротора.

Моделирование номинального режима

Для расчета параметров модели в номинальном режиме использованы паспортные данные турбогенератора ТЗФ-160, представленные в табл. 1. Угол δ может быть получен из сравнения зависимости электромагнитного момента от угла δ $M(\delta)$ и номинального момента $M_{\text{ном}}$. Определения угла $\delta_{\text{ном}}$ для номинального режима показано на рис. 2.



a



б

Рис. 2. К определению угла δ в номинальном режиме: *a* – направление векторов магнитного поля; *б* – определение угла $\delta_{\text{ном}}$

Секция 1

По результатам расчета турбогенератора в синхронном режиме получены временными зависимостями напряжения и тока статора в номинальном режиме, показанные на рис.3 и значение электромагнитного момента. Графики напряжения представлены в относительных единицах, за базовые значения приняты номинальные напряжение и ток статора. Используя полученные характеристики, определяется угол $\varphi_{\text{ном}}$ между напряжением и током, и рассчитываются параметры мощности:

$$S = \sqrt{3}U \cdot I_{\text{ст}} ,$$

$$P = M \cdot \omega ,$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) ,$$

где S – расчетное значение полной мощности; U – расчетное линейное напряжение статора, $I_{\text{ст}}$ – заданный фазный ток статора, M – расчетное значение электромагнитного момента; ω – заданная угловая скорость (синхронная), φ – расчетное значение угла между током и напряжением.

В табл. 2 показаны результаты сопоставления рассчитанных параметров турбогенератора в номинальном режиме и паспортных данных. Сравнение показало существенное отклонение по реактивной мощности (25 %), при отклонении остальных параметров не более 2,5 %. Такое отклонение может быть вызвано тем фактом, что при расчете паспортных данных не учитывалось насыщения стали.

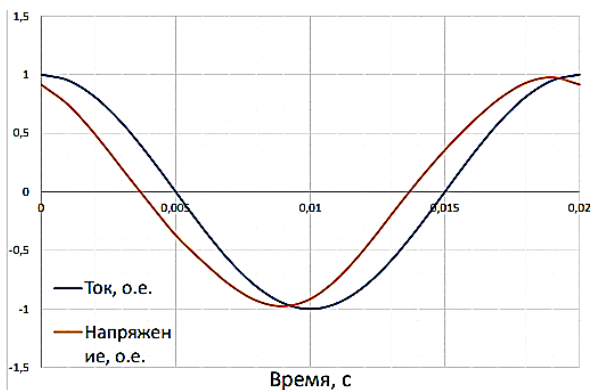


Рис. 3. Напряжение ток статора в номинальном режиме

Сравнение расчетных и паспортных данных для номинального режима

	Паспорт	Модель
U , кВ	15,75	15,62
S , МВА	188,235	186,75
P , МВт	160	159,35
Q , Вар	99	74,16

Моделирование реальных режимов

Для дополнительной верификации модели проведено сопоставление результатов моделирования с параметрами режимов на реальном турбогенераторе, полученных из системы АСУТП. Выбранные для сопоставления режимы показаны на диаграмме мощностей турбогенератора ТЗФ-160 (рис. 4).

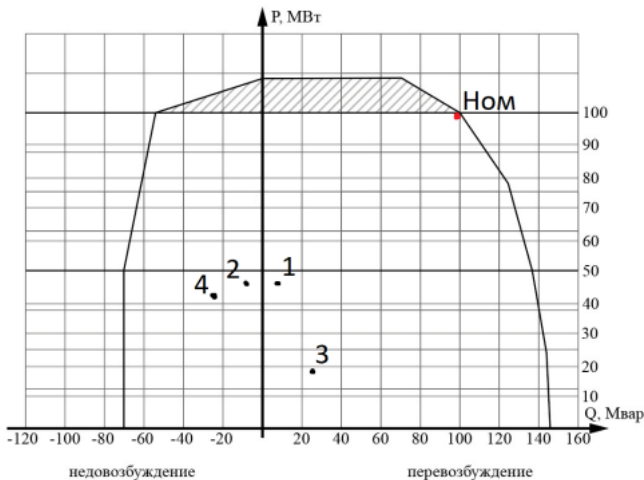


Рис. 4. Реальные режимы работы на диаграмме мощностей ТЗФ-160

Анализ выбранных режимов работы и расчет параметров проведен по методике, описанной выше. Для сравнения определялись значение напряжения, а также активной, реактивной и полной мощностей. Графики напряжения и тока, полученные для реальных режимов, представлены на рис. 5.

Сопоставление расчетных и измеренных данных в реальных режимах работы турбогенератора приведены в табл. 3. Как вид-

Секция 1

но из результатов сравнение расхождение не превышает 6 % и зависит от режима работы. Сильное влияние на результаты моделирования оказывает точность аппроксимации электромагнитного момента при определении угла δ , поскольку даже небольшие смещения угла между магнитными осями приводят к существенным изменениям напряжения. Также расхождения больше наблюдаются при увеличении полной мощности, что связано с сильным влиянием насыщения стали.

Таблица 3

Сравнение расчетных и измеренных данных для реальных режимов

Параметр	Тип данных	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
$I_{ст}$, кА	АСУ	2,72	2,8	1,34	1,79
	Модель				
$I_{в}$, кА	АСУ	0,994	0,881	0,912	0,772
	Модель				
U , кВ	АСУ	15,995	15,85	15,84	15,85
	Модель	16,9	16,44	16,33	16,25
	Расхождение	6,57 %	3,76 %	3,09 %	2,55 %
S , МВА	АСУ	75,29	75,29	37,64	75,29
	Модель	79,74	79,83	38,07	78,49
	Расхождение	5,91 %	6,03 %	1,13 %	4,24 %
P , МВт	АСУ	74,73	74,73	30,45	70,75
	Модель	75,04	75,3	29,9	71,78
	Расхождение	0,41 %	0,76 %	1,82 %	1,45 %
Q , Вар	АСУ	9,17	-9,17	22,13	-25,75
	Модель	8,75	-8,76	22,38	-24,25
	Расхождение	4,62 %	4,52 %	1,13 %	4,24 %

Выводы

Предложенная в статье трехмерная модель позволяет проводить расчеты распределения поля в магнитную систему турбогенератора, включая неоднородное распределение поля в торцевых зонах, а также с учетом насыщения стали ротора и статора.

Верификация модели проведена на основе сопоставление с паспортными данными и данными АСУТП, полученными с реального турбогенератора. Результаты сравнения показывает удовлетворительную сходимость с измеренными данными.

Уточнение модели возможно путем уменьшения расчетной сетки, уточнения геометрии и свойств магнитных материалов.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта «Разработка цифровых моделей электромеханических преобразователей энергии для систем онлайн мониторинга» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022-2024 гг.».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ryzhov V. Three-dimensional Thermal Stator Model of a Fully Air-cooled Turbogenerator / Ryzhov V., Dergachev P., Kurbatov P. – 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), 2020. – doi: 10.1109/IWED48848.2020.9069552.

2. P. Wang. Numerical calculation of the end region of large air-cooled turbo-generator under the single-phase earth fault / P. Wang, W. Li, Y. Li, Y. Su, D. Li, J. Zeng, J. Li, J. Shen. – 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 – doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056292.

3. Шаров Ю.В. Концепция online-диагностирования и мониторинга турбогенераторов с использованием компьютерных технологий в автоматизированных системах контроля / Шаров Ю.В., Беляков В.В., Виноцкий Ю.Д., Голоднова О.С. – Энергетик, 2019. – № 6, с. 15–22.

4. A. Ebrahimi. Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators / A. Ebrahimi. – 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019. – pp. 1059-1066. – doi: 10.1109/ISIE.2019.8781529.

Авторы:

Костенко Александр Александрович, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ». Окончил факультет электротехники и электрификации (ИЭТ) НИУ «МЭИ» в 2023 году. E-mail: kostenkoala@mpei.ru.

Курбатова Екатерина Паловна, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ». Окончила факультет электротехники (ИЭТ) НИУ «МЭИ» в 2013 году. В 2017 году защитила кандидатскую диссертацию «Разработка методов моделирования и проектирования высокотемпературного сверхпроводящего подшинника для кинетического накопителя энергии». E-mail: kurbatovaep@mail.ru.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ НА УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Маркевич М.В., Андреев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Проанализированы современное состояние, а также тенденции и перспективы развития технологий позиционирования железнодорожных составов. Из них активно разрабатывается в последние годы в мире технология дистанционного виброакустического зондирования.*

***Ключевые слова:** виброакустическое зондирование, позиционирование железнодорожных составов, С-OTDR, ф-OTDR.*

Введение

Системы интервального регулирования движения поездов (ИРДП) служат на железнодорожном транспорте для обеспечения безопасного и эффективного процесса перевозок. В исторически сложившемся названии «Система сигнализации, централизации и блокировки» (СЦБ) содержится указание на главные принципы их реализации и основные составные части. Так, для сигнализации и передачи соответствующих команд машинистам используются семафоры. Безопасность движения железнодорожного транспорта обеспечивается блокировкой участков пути. Сигнализация и блокировка основаны, как правило, на централизованном принципе управления. Следует отметить, что классические системы железнодорожной автоматики в большинстве случаев обеспечивают только регулирование с целью безопасного движения по путям. В то же время, автоматизация управления движением на железнодорожных путях за счёт внедрения систем автоматического ведения транспорта (автопилотов) позволит оптимизировать режимы разгона, выбега и торможения. Результатом такого управления станет экономия электроэнергии / топлива при комфортном графике движения.

В настоящее время технология дистанционного виброакустического зондирования, используемая для распределенного мониторинга вибраций вдоль железнодорожных путей, пред-

ставляет существенный интерес. К такой технологии относится, в частности, оптическая когерентная рефлектометрия (С-OTDR), являющаяся современной технологией мониторинга опосредованного через грунт акустического воздействия различных подвижных объектов на распределённый сенсорный датчик (например, оптическое волокно). Благодаря малообслуживаемости, низкой стоимости, возможности увеличения пропускной способности участка железнодорожной линии С-OTDR-система выступает в качестве альтернативы технологии рельсовых цепей для интервального регулирования железнодорожного движения.

Анализ технологий позиционирования поездов на участке железнодорожной линии методом дистанционного виброакустического зондирования

Контроль движения состава на участках железнодорожной линии по технологии дистанционного акустического зондирования протяженных объектов с волоконно-оптическим кабелем в качестве распределённого датчика позволяет отказаться от СЦБ в системах ИРДП [1, 2].

Фазочувствительная оптическая временная рефлектометрия (ф-OTDR) в последние годы широко используется для дистанционного мониторинга вибрационных сигналов [3]. Поскольку системы ф-OTDR обычно работают в средах с динамично меняющимися характеристиками, часто возникают ложные срабатывания. Также многочисленные шумовые помехи являются основным камнем преткновения на пути к повышению эффективности системы. Совсем недавно методы машинного обучения для классификации событий, помогающие идентифицировать и классифицировать события вторжения, стали широко обсуждаемой темой. В работе [3] представлен обзор технологий, начиная от традиционных алгоритмов машинного обучения до глубоких нейронных сетей, направленных на повышение точности распознавания и снижение частоты ложных тревог в системах OTDR. Выполнены сравнительный анализ существующих методов классификации, а также оценка их эффективности с точки зрения точности классификации ложных тревог, полноты, времени идентификации и других параметров. В работе [4] пред-

ложен метод распознавания, основанный на анализе энергетического спектра вейвлета, достигший средней точности 88,60% в классификации событий. Метод мониторинга сейсмоакустической активности на основе использования виброчувствительных свойств оптических волокон рассмотрен в работе [5]. Этот подход может применяться для комплексного мониторинга железных дорог. В работе [0] исследовано влияние на рефлектометр мощности импульсного света, поступающего в чувствительное волокно. Рассмотрены две системы, основанные на дифференциальном способе и методе обнаружения краев Превитта, для одномерной и двумерной локации вибрации соответственно. Для трехмерного мониторинга вибрации в реальном времени применена высокоскоростная система сбора данных на основе ПЛИС. Такой распределенный датчик вибрации можно использовать в качестве идеального источника для идентификации вторжений третьих лиц, мониторинга трубопроводов и обнаружения ультразвуковых волн во взрывоопасных средах. Метод стабильного обнаружения сейсмоакустических источников с помощью систем С-OTDR, гарантирующий заданные верхние границы вероятностей ошибок I и II рода, предложен в работе [7]. Проблема интеграции информации от многоканальной системы С-OTDR для классификации сейсмоакустических событий рассмотрена в работе [8]. Сравнением нескольких способов сделан вывод, что метод обратных констант Липшица является оптимальным для слияния информации из множества каналов. Описан физический процесс возникновения обратного рассеянного сигнала и выделен диапазон частот сейсмоакустических волн от 1 Гц до 350 Гц, содержащий значимую информацию для последующего анализа. Метод, основанный на скрытой марковской модели и аналога метода Витерби, позволяющий оценить целостность подвижного состава, представлен в работе [9]. Сделан вывод о наличии корреляция между числом вагонов и числом пауз между сериями ударов, возникающих при прохождении колесных пар через изолирующий стык.

В работе [10] предложены методы анализа данных от системы распределенного акустического зондирования для отслеживания движения поездов в реальном времени и контроля их целостности. Сделан вывод, что метод, основанный на опреде-

лении времени прибытия поезда в заданное положение рельса, менее чувствителен к флуктуациям рассеяния волокна и приводит к меньшей неопределенности скорости, чем метод, основанный на нахождении границ поезда для заданного момента времени. Однако в первом методе требуется большее время для анализа данных. Разработан алгоритм с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) для обработки данных.

В работе [11] на основе анализа акустического спектра и взаимосвязи спектра со скоростью движения поезда предложены два метода преобразования данных. Первый основан на модели, в которой учитываются для каждого рельса создаваемые всем железнодорожным составом при его движении акустические сигналы. В основе второго лежит модель, в которой ось преобразованного водопадного представления акустических данных сводится к длине поезда. Сделан вывод, что описанные методы преобразования данных упрощают анализ и позволяют выявить ценные свойства рельсов и поездов. Низкочастотная сигнатура (ниже 50 Гц) акустического спектра позволяет посчитать количество вагонов. В работе [12] предложен метод надежной оценки сигнала с помощью нейронных сетей, позволяющий автоматически распознавать и фильтровать акустические сигналы от разных источников. Также рассмотрен алгоритм с использованием искусственного интеллекта для калибровки оптоволоконного кабеля в процессе установки системы. В работе [13] предложен корреляционный метод поиска пространственных точек, в которых временные формы акустических волн повторяются. Пространственные точки мониторинга с хорошей временной повторяемостью формы волны могут быть автоматически выделены с помощью предложенного метода.

В работе [14] исследованы с помощью ϕ -OTDR вибрации, генерируемые двумя поездами, которые двигались в противоположном направлении по двум параллельным путям с постоянной скоростью. Предложено вейвлет-преобразование для улучшения отношения сигнал/шум. Показано, что ϕ -OTDR целесообразно применять для мониторинга безопасности движения поездов. Для более точных измерений предложено прокладывать чувствительный кабель под железной дорогой во время ее строительства. Использование ИНС для обработки сигналов по-

вышает производительность системы [15]. Устойчивость ИНС к локальным пространственным или временным особенностям в сигналах позволяет их использовать для анализа скорости движения. Традиционная детерминированная обработка основана на центрировании сигнала прохождения поезда вдоль участка железной дороги в одном временном окне по всем координатам оптоволоконка. Тем самым, по ширине полученной полосы (длительность прохождения поезда заданной координаты оптоволоконка) и известной длине поезда можно вычислить скорость движения. В то же время ИНС обеспечивает более высокую скорость обработки, а также возможность обучения сети на большом объеме записей движения поездов с учетом особенностей каждого участка оптоволоконка является ее преимуществом.

В работе [16] исследованы с помощью ф-OTDR сигналы вибрации оптического волокна при проезде грузового поезда грузоподъемностью десять тысяч тонн (общая длина составляет около 2 км). Метод основан на алгоритме обнаружения краев Канни. Для повышения точности распознавания поездов в условиях шума вдоль железной дороги предложенный алгоритм Канни дополнен методом адаптивного выбора порога на основе метода Оцу [17]. Для шумоподавления предложен алгоритм кубического сглаживания с пятиточечной аппроксимацией. Показано, что усовершенствованный метод Канни позволяет точно отслеживать движение поездов в режиме реального времени, что потенциально может быть применено для обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте.

Выводы

Особую значимость приобретают технологии позиционирования железнодорожных составов, среди которых активно развивается дистанционное виброакустическое зондирование. Она основана на распределённом мониторинге вибраций вдоль железнодорожных путей. Эта технология экономически выгодна в задачах интервального регулирования движения железнодорожного транспорта при замене технологии рельсовых цепей, характеризующейся крайне высокой стоимостью сервисного обслуживания, значительным потреблением электрической энергии, а также не полностью удовлетворяет современным стандартам безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркурьев К.М. Система интервального регулирования движения поездов на основе дистанционного виброакустического зондирования железнодорожного полотна // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 27–31.
2. Баранов Л.А. Бурченков В.В. Технология мониторинга подвижного состава на основе дистанционного акустического зондирования // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, №1. С. 90–100.
3. Deus F. Kandamali, Xiaomin Cao, Manling Tian et al. Machine learning methods for identification and classification of events in Φ -OTDR systems: a review // Appl. Opt. 2022. V. 61. P. 2975–2997.
4. Yi Shi, Shangwei Dai, Xinyu Liu et al. Event recognition method based on dual-augmentation for a Φ -OTDR system with a few training samples // Opt. Express. 2022. V. 30. P. 31232–31243.
5. Andrey V. Timofeev. Monitoring the Railways by Means of C-OTDR Technology // International Journal of Computer and Information Engineering. 2015. V. 9, №5. P. 717–720.
6. Yu Wang, Baoquan Jin, Yuncai Wang et al. Real-Time Distributed Vibration Monitoring System Using Φ -OTDR // IEEE sensors journal. 2017. V. 17, №5. P. 1333–1341.
7. Andrey V. Timofeev, Victor Denisov. The robust detection of the seismoacoustic emission sources in the C-OTDR monitoring systems. https://flagman-geo.com/wp-content/uploads/2022/07/15_robust_detection.pdf.
8. Andrey V. Timofeev. Comparison of various approaches to multi-channel information fusion in c-otdr systems for remote monitoring of extended objects // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2015. V. 15, №1. P. 122–129.
9. Тимофеев А.В., Грознов Д.И. Метод оперативного контроля целостности поездного состава на основе данных оптической когерентной рефлектометрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, №6. С. 1140–1152.
10. Kowarik S., Hussels M.-T., Chruscicki S. et al. Fiber Optic Train Monitoring with Distributed Acoustic Sensing: Conventional and Neural Network Data Analysis // Sensors. 2020. V. 20, №2. 450.
11. Cedilnik G., Hunt R., Lees G. Advances in Train and Rail Monitoring with DAS // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group. 2018. Paper ThE35.
12. Laemmerhirt A., Schubert M., Drapp B. et al. Fiber Optic Sensing for Railways - Ready to Use?! SIGNAL + DRAHT // SIGNALLING & DATA COMMUNICATION. 2022. V. 114. P. 60–69.

13. *Muñoz F., Urricelqui J., Soto M.A. et al.* Finding Well-Coupled Optical Fiber Locations for Railway Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing // *Sensors*. 2023. V. 23, №14. 6599.

14. *Peng F., Duan N., Rao Y.-J. et al.* Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26, №20. P. 2055–2057.

15. *Karapanagiotis C., Hicke K., Krebber K.* A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring // *Technisches Messen*. 2023. V. 90, №3. P. 177–195.

16. *Meng He, Liu Feng, Jiaming Fan.* A method for real-time monitoring of running trains using Ф-OTDR and the improved Canny // *Optik*. 2019. V. 184. P. 356–363.

17. *Ostu N., Nobuyuki O., Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histogram // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1979. V. 9, №1. P. 62–66.

Авторы:

Маркевич Мария Валерьевна, аспирант кафедры теплоэнергетических установок, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончила институт системного анализа и управления государственного университета «Дубна» в 2011 году (магистратура). E-mail: maria.ya.komandirova@gmail.com.

Андреев Всеволод Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетических установок, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил физико-математический факультет Чувашского государственного университета в 1989 году. Учёную степень по теме «Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых гранулах катализатора» получил в 1994 году. E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru.

СПОСОБ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ

Шихин В.А., Обычайко Д.С., НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

Хрисостому Г., Технологический университет им. Фредерика, г. Никозия, Кипр

***Аннотация.** Предложенные уравнения связывают вероятность возврата в рабочее состояние с интенсивностью отказов и различными типами восстановлений аварийной системы. Решение дифференциальных уравнений дает ясную графическую интерпретацию изменения вероятности перехода компонентов системы из одного состояния в другое по временным срезам жизненного цикла цифровой подстанции. Разработанная схема принятия решения о восстановлении или замене соответствующего компонента позволяет сделать обоснованный выбор варианта действий.*

***Ключевые слова:** жизненный цикл; эксплуатационная надежность; принятие решений; схема графика состояний.*

Введение

Процесс восстановления цифровая подстанции (ЦПС) как типичного представителя класса киберфизических систем (КФС) [2,3] является предметом рассмотрения. Предлагаемый подход основан на разделении жизненного цикла КФС на временные отрезки с привязкой к предаварийному, аварийному, восстановленному и прогнозируемому состояниям [4].

Численная процедура метода на примере оценки эксплуатационной надежности цифровой подстанции

Цифровая подстанция представляет собой типичный пример КФС. ЦПС состоит из физических компонентов и кибернетических компонентов, таких как мультиплексоры (Merging Units), выносные устройства связи с объектом (УСО), различные интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ, или Intelligent Electronic Devices – IED), шина процесса (Process Bus), шина станции (Station Bus), цифровые измерительные трансформаторы, Ethernet-коммутаторы и др. Исходная (проектная) информация о характеристиках системы, необходимых для расчета, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Проектная информация по показателям надежности ЦПС

Наименование показателя надежности	Паспортное (проектное) значение
Коэффициент готовности	$K_G = 0,99$
Среднее время наработки на отказ	$T_{\text{отк ср}} = 8000 \text{ ч.}$
Коэффициент полноты информации	$K_{\text{ПИ}} = 0,99$
Коэффициент конфликтности оборудования	$K_K = 0$
Коэффициент активности оператора	$K_{\text{АО}} = 0$
Балансовая стоимость системы	$C_0 = 2\,000\,000\,000 \text{ руб.}$
Время жизненного цикла	$T_{\text{ЖЦ}} = 10 \text{ лет (87\,600 часов)}$

Предположим, что в жизненном цикле ЦПС в определенный момент времени T_1 происходит аварийный отказ одного кибернетического компонента – цифрового измерительного трансформатора. Доступная технологическая информация о вышедшем из строя компоненте отражена в табл. 2.

Таблица 2

Данные по аварийной ситуации

Отказавший компонент	Тип отказавшего компонента	Актуальное время восстановления	Принадлежность к классу оборудования
Цифровой измерительный трансформатор	Кибернетический компонент	$T_{\text{вос}} = 2 \text{ часа}$	Чрезвычайно-критическое оборудование

После получения необходимой технологической информации производится расчет надежности ЦПС по нейромодели. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели надежности ЦПС

	Показатель готовности	Среднее время наработки на отказ
С учетом восстановления посредством ремонта компонента	$K_{G1} = 0,90$	4500 часов
С учетом замены компонента	$K_G = 0,98$	8000 часов

Секция 1

Согласно данным табл. 3 по коэффициенту готовности K_T и времени наработки на отказ T_{OTK} , строим диаграмму принятия решений (ДПР), представленную на рис. 1.

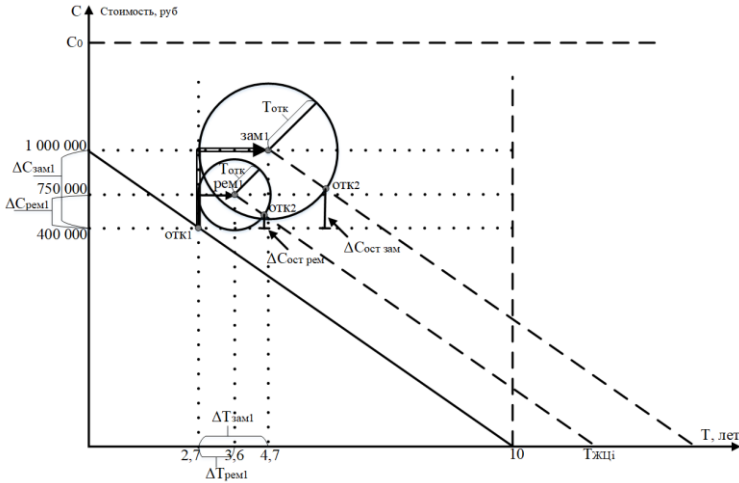


Рис. 1. Диаграмма принятия решение по восстановлению аварийного трансформатора или его замене

Производим определение и расчет параметров на основе анализа диаграммы рис. 1:

$$C_0 = 2\,000\,000\,000 \text{ руб.}; T_{ЖЦ} = 10 \text{ лет}; \Delta C_{\text{рем}} = 350\,000 \text{ руб.}; \\ \Delta C_{\text{зам}} = 600\,000 \text{ руб.}; \Delta T_{\text{рем}} = 0,9 \text{ г.}; \Delta T_{\text{зам}} = 2 \text{ г.}$$

Производим расчет остаточной стоимости, коэффициентов экономической эффективности замены и ремонта компонента:

$$\Delta C_{\text{ост рем}} = 500\,000 \text{ руб.}; \\ \Delta C_{\text{ост зам}} = 800\,000 \text{ руб.}; \\ K_{\text{ЭкЭфР}} = \Delta C_{\text{ост рем}} / \Delta C_{\text{рем}} = 500\,000 / 350\,000 = 1,42; \\ K_{\text{ЭкЭфЗ}} = \Delta C_{\text{ост зам}} / \Delta C_{\text{зам}} = 800\,000 / 600\,000 = 1,33.$$

Принимаем решение о предпочтительности замены трансформатора на основе полученных соотношений для рассчитанных коэффициентов [1]:

$$\Delta C_{\text{ост зам}} > \Delta C_{\text{ост рем}} \text{ и } K_{\text{ЭкЭфР}} > K_{\text{ЭкЭфЗ}}.$$

Согласно установленной принадлежности поврежденного компонента к классу чрезвычайно-критического оборудования,

Секция 1

получим численные оценки коэффициентов дифференциальных уравнений на основе априорной и экспертной информации, с учетом ограничений на соотношения коэффициентов восстановления и отказов с учетом введенных ограничений:

$$\alpha_{AB}^{ЧК}, \alpha_{PB}^{ЧК}, \alpha_{ВПУ}^{ЧК}, \beta_{AB}^{ЧК}, \beta_{PB}^{ЧК}, \beta_{ВПУ}^{ЧК}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \leq 1.$$

где $\alpha_{AB}^{ЧК} = 0$; $\alpha_{PB}^{ЧК} = 0,8$, $\alpha_{ВПУ}^{ЧК} = 0$ – интенсивности автоматического, ручного и восстановления по умолчанию соответственно;

$\beta_{AB}^{ЧК} = 0$; $\beta_{PB}^{ЧК} = 0,4$; $\beta_{ВПУ}^{ЧК} = 0$ – интенсивности отказа автоматического ручного и восстановления по умолчанию соответственно;

$\gamma_1 = 0,95$ – коэффициент вероятности замены компонента; $\gamma_2 = 0$ – коэффициент вероятности восстановления компонента; $\gamma_3 = 0$ – коэффициент вероятности восстановления компонента по умолчанию.

После определения коэффициентов осуществляется расчет вероятности перехода ЦПС в восстановленное состояние. Расчет производится в соответствии с уравнением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{T_{ЖЦ}} \cdot P_{12}^{\PhiК} = (\alpha_{AB}^{ЧК} + \alpha_{PB}^{ЧК} - \beta_{AB}^{ЧК} - \beta_{PB}^{ЧК}) \cdot \frac{dP_{12}^{\PhiК}}{dt} + \gamma_1 \cdot P_{ЗАМ}^{\PhiК} + \gamma_2 \cdot P_{РЕМ}^{\PhiК} \\ \frac{1}{T_{ЖЦ}} \cdot P_{12}^{КК} = (\alpha_{AB}^{ЧК} + \alpha_{PB}^{ЧК} + \alpha_{ВПУ}^{ЧК} - \beta_{AB}^{ЧК} - \beta_{PB}^{ЧК} - \beta_{ВПУ}^{ЧК}) \cdot \frac{dP_{12}^{КК}}{dt} + \\ + \gamma_1 \cdot P_{ЗАМ}^{КК} + \gamma_2 \cdot P_{РЕМ}^{КК} + \gamma_3 \cdot P_{ВПУ}^{КК} \end{array} \right.$$

где $P_{12}^{\PhiК}$ – вероятность перехода системы из состояния $S_1^{\PhiК}$ в состояние $S_2^{КФС}$; $P_{12}^{КК}$ – вероятность восстановления системы при сбое КК путем перехода из состояния $S_1^{КК}$ в состояние $S_2^{КФС}$; $\alpha_{AB}^{ЧК}$, $\alpha_{PB}^{ЧК}$, $\alpha_{ВПУ}^{ЧК}$ – интенсивность автоматического, ручного и по умолчанию восстановления чрезвычайно-критического оборудования, соответственно; $\beta_{AB}^{ЧК}$ – интенсивность отказа автоматического восстановления; $\beta_{PB}^{ЧК}$ – интенсивность отказа ручного восстановления; $\beta_{ВПУ}^{ЧК}$ – интенсивность отказа восстановления по

Секция 1

умолчанию; $P_{\text{РЕМ}}^{\text{КК}}$, $P_{\text{ЗАМ}}^{\text{КК}}$, $P_{\text{РЕМ}}^{\text{КК}}$ – вероятность восстановления кибернетического компонента с помощью его замены или ремонта, соответственно; $P_{\text{ЗАМ}}^{\text{ФК}}$, $P_{\text{РЕМ}}^{\text{ФК}}$ – вероятность восстановления физического компонента с помощью его замены или ремонта, соответственно; γ_1 , γ_2 , γ_3 – интенсивность замены компонента, ремонта компонента и восстановления компонента по умолчанию, соответственно; $T_{\text{ЖЦ}}$ – время жизненного цикла КФС.

Имеем:

$$P_{12}^{\text{КК}} = T_{\text{ЖЦ}} \cdot (\alpha_{\text{РБ}}^{\text{ЧК}} - \beta_{\text{РБ}}^{\text{ЧК}}) \cdot \left(-\frac{dP_{12}^{\text{КК}}}{dt} \right) + T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1 \cdot P_{\text{ЗАМ}}^{\text{ФК}}.$$

Произведем замену $T_{\text{ЖЦ}} \cdot \alpha_{\text{РБ}}^{\text{ЧК}} - T_{\text{ЖЦ}} \cdot \beta_{\text{РБ}}^{\text{ЧК}} = K$ и преобразуем:

$$P_{12}^{\text{КК}}(S) = -K \cdot S \cdot P_{12}^{\text{КК}}(S) + T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1 \cdot P_{\text{ЗАМ}}^{\text{КК}}.$$

Тогда

$$G_{\text{ЗАМ}}(S) \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_{12}^{\text{КК}}(S)}{P_{\text{ЗАМ}}^{\text{КК}}(S)} = \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K \cdot S + 1};$$

$$\begin{aligned} P_{12}^{\text{КК}} &= \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{S \rightarrow \infty} S \cdot f(S) = \lim_{S \rightarrow \infty} S \cdot \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K \cdot S + 1} = \\ &= \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K \cdot \frac{1}{S}} = \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K}; \end{aligned}$$

$$P_{12}^{\text{КК}} = G_{\text{ЗАМ}}(S) \cdot P_{\text{ЗАМ}}^{\text{КК}} + G_{\text{РЕМ}}(S) \cdot P_{\text{ВОС}}^{\text{КК}}$$

$$G_{\text{ЗАМ}}(S) \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_{12}^{\text{КК}}(S)}{P_{\text{ЗАМ}}^{\text{КК}}(S)} = \frac{1}{1,2 \cdot S + 1}.$$

Подставив значения известных коэффициентов, получаем:

$$G_{\text{ЗАМ}}(S) \stackrel{\Delta}{=} \frac{87600 \cdot 0,95}{1,2 \cdot S + 1} \stackrel{\Delta}{=} \frac{83220}{1,2 \cdot S + 1};$$

Используя формулу (10):

$$\begin{aligned} P_{12}^{\text{КК}} &= \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{S \rightarrow \infty} S \cdot f(S) = \lim_{S \rightarrow \infty} S \cdot \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K \cdot S + 1} = \\ &= \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K \cdot \frac{1}{S}} = \frac{T_{\text{ЖЦ}} \cdot \gamma_1}{K}. \end{aligned}$$

Рассчитываем вероятность возврата системы в рабочее состояние: $P_{12}^{KK} = 0,79$.

На рис. 2 с целью наглядного сравнения показано два возможных процесса во времени по возврату ЦПС в рабочее состояние для ранее выбранного варианта восстановления путем замены компонента на новый, а также для альтернативного отвергнутого варианта с ремонтом компонента.

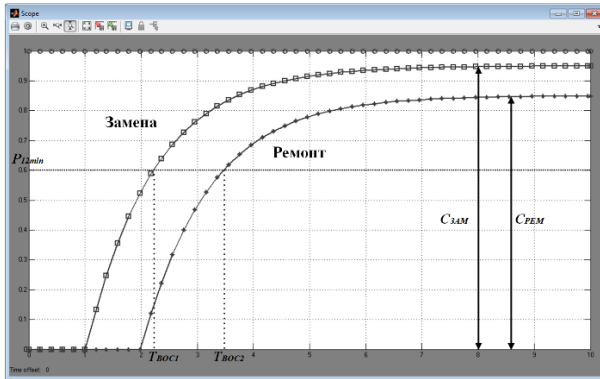


Рис. 2. Переходной процесс $G_{ЗАМ}(t)$, $G_{РЕМ}(t)$

На графиках показаны критерии в виде стоимости $C_{ЗАМ}$, $C_{РЕМ}$ и время возврата в рабочее состояние $T_{ВОС1}$, $T_{ВОС2}$, которые использовались выше по тексту для принятия решения по выбору варианта возврата в рабочее состояние. Система возвращается в работоспособное состояние с вероятностью $P_{12}^{KK} = 0,79$ и за время $T_{ВОС1} = 3$ ч. Для данного состояния производится перерасчет показателя надежности уже восстановленной системы. Актуализированные коэффициент готовности $K_{Г} = 0,98$ и время наработки на отказ $T_{ОТК} = 8000$ ч.

Выводы

1. На основе построенных графиков предложено решение задачи определения вероятности восстановления работоспособности КК и ФК. Подход основан на введении дифференциальных уравнений, результат решения которых определяется константами и параметрами, связанными с частотой отказов, восстановлением системы и процессом восстановления компонен-

тов. При известных начальных вероятностях состояний КК и ФК полученное графическое отображение решения введенных дифференциальных уравнений позволяет представить изменение вероятностей перехода компонентов системы из одного состояния в другое по временным срезам на протяжении жизненного цикла системы.

2. Предлагаемый способ оценки эксплуатационной надежности КФС-системы основан на разработанной схеме принятия решений. Схема позволяет сделать разумный, хорошо формализованный выбор между вариантами восстановления работоспособности системы путем ремонта или замены вышедших из строя компонентов. Принятие решения преобразуется в достаточно ясную численную процедуру проверки определенных соотношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Обычайко Д.С., Шихин В.А.* Анализ и принятие решений по эксплуатационной надежности кибер-физических систем. // Вестник МЭИ, №3, 2023. С.154–162.

2. *Fei Hu, Yu Lu, A. V. Vasilakos, et al.* Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation // Future generation computer systems. 2016. Vol. 56. P. 449–475.

3. *Antsaklis P.* Goals and challenges in cyber-physical system research // IEEE Trans. on Automatic Control. 2014. Vol. 59. No. 12. P. 2017–2019.

4. *Шубин Р.А.* Надежность технических систем и техногенный риск. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». 2012.

Авторы:

Шихин Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, НИУ МЭИ. Окончил факультет АВТФ НИУ «МЭИ» в 1977 году. В 1982 году получил ученую степень по тематике «Управление в технических системах». E-mail: ShikhinVA@mpei.ru.

Обычайко Дмитрий Сергеевич, магистр, ассистент, НИУ МЭИ. Окончил институт ИВТИ НИУ «МЭИ» в 2017 году. Получил ученую степень магистра по тематике «Управление в технических системах». E-mail: ObuchaikoDS@mpei.ru.

Хрисостому Георгий, доктор физико-математических наук, профессор, Технологический университет им. Фредерика, Никозия, Кипр. Окончил Калифорнийский университет США в 1973 году. Получил ученую степень по тематике физико-математических наук в 1983 году. E-mail: Chrysostomou_George@yahoo.com.

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ЛИНИЯХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Ефремов В.А., А.В. Ефремов, Петрушков М.Ю., ООО «Релематика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Смирнов С.Ю. АО «ВНИИР, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация:** Активное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистемы РФ и СНГ породило проблему применимости современных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на энергообъекты с ВИЭ. Значительная часть ВИЭ интегрируется в энергосистему посредством инверторных преобразователей, являющихся по сути зависимыми от напряжения сети источниками тока. Использование РЗА с классическими алгоритмами функционирования не только нецелесообразно, но и не позволяет достичь на устройствах РЗА необходимой чувствительности, являющейся определяющим параметром для использования защиты. В докладе приведен анализ предлагаемых проектных решений по применению РЗА на объектах с ВИЭ и даны предложения по изменению схемных решений для достижения целей по обеспечению нормативной чувствительности РЗА для линий электропередачи (ЛЭП) с ВИЭ.*

***Ключевые слова:** релейная защита и автоматика, возобновляемые источники энергии, информационные параметры РЗА, проектные решения РЗА для объектов с ВИЭ, чувствительность РЗА.*

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция наращивания выработки электрической энергии (э/э) за счет внедрения объектов с возобновляемыми источниками электроэнергии в энергосистему России [1]. Современные типы генераторов ветряных электростанций (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС) с фотоэлектрическими панелями подключаются к сети с помощью инверторных преобразователей.

В докладе рассмотрены проектные решения по реализации устройств РЗА на ЛЭП и приведены способы использования существующих измерительных органов для защит линий, отходящих от ВЭС или СЭС, применяющих для связи с питающей энергосистемой инверторные преобразователи.

Анализ проектных решений по применению РЗА в сетях ВЭС/СЭС

Внедрение устройств РЗА на подстанциях, подключенных к ВЭС или СЭС, проводится сейчас без учета особенностей электростанций ВИЭ. Как уже было отмечено [2,3], наличие инверторного преобразователя в схеме подключения ветряных и солнечных электростанций к сети обуславливает существенное отличие режимов работы сети. При этом трансформируются информационные параметры РЗА, изменения величин токов короткого замыкания (КЗ) в отличие от токов КЗ традиционных электростанций становятся неотличимы от нагрузочных режимов и, как следствие, интеграция ВЭС/СЭС требует в значительной степени перестраивать условия функционирования РЗА линий электропередачи. Применение классических функций РЗА на таких объектах недопустимо, поскольку это может приводить как к снижению чувствительности, так и к полному отказу в срабатывании защиты.

Внутреннее сопротивление инверторного преобразователя ВЭС (СЭС) в значительной степени превышает сопротивление внешней сети, поэтому для внешней сети такие энергообъекты выступают в роли подключенного управляемого источника тока, а не в качестве источника электродвижущей силы. При возникновении КЗ во внешней сети, величина выходного тока инвертора ограничивается алгоритмом управления, чтобы не допустить теплового пробоя полупроводниковых ключей инвертора. Выходная величина тока такой электроустановки при КЗ, в общем случае, не превышает $2,0 I_{\text{ном}}$ [4], а в установившемся режиме КЗ данная величина находится в диапазоне от номинального тока $I_{\text{ном}}$ до $1,5 I_{\text{ном}}$ [5,6]. Если вся существующая до сих пор РЗА построена в предположении, что источники электрической энергии являются идеальными источниками электродвижущей силы (ЭДС), то для электроустановок с ВИЭ требуются иные подходы и принципы выполнения алгоритмов защиты.

Анализ сетей с ВИЭ показывает, что такие электростанции имеют ограничения по мощности, а потому встраиваются уже в существующие сети и ставятся:

– либо в рассечку действующей транзитной линии, делая проходную подстанцию (рис. 1, *a*);

— либо соединяя электростанцию с ВИЭ с питающей подстанцией отдельной двухцепной линией, а сама электростанция практически становится тупиковой (рис. 1, б) и, как правило, имеет большую мощность по сравнению с электростанциями ВИЭ, включенных на действующую линию.

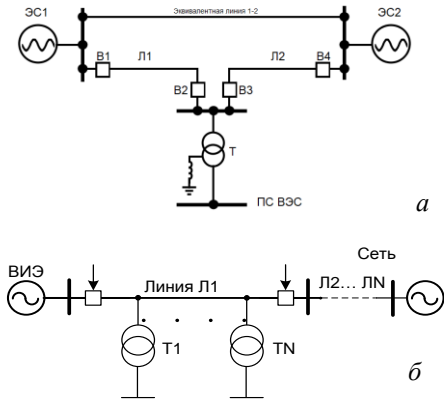


Рис. 1. Подключение станции ВИЭ к сети: а – в рассечку действующей

В первом случае с точки зрения РЗА задача, кажется, решается проще, т. к. транзитный режим позволяет использовать алгоритмы функционирования традиционных РЗА. Исходя из условия, что доля тока КЗ от станции с ВИЭ практически близка к нулю, то такой подход возможен. Однако вывод одной из линий в ремонт потребует вывода из работы также и всей электростанции ВИЭ в целом

из-за того, что защиты со стороны ВИЭ в таком режиме оказываются неработоспособны.

Анализ работы и частичные решения по защите тупикового варианта подключения ВИЭ к питающей подстанции был рассмотрен [2,3]. Здесь же был сделан анализ о возможном применении различных типов защит для ЛЭП с ВИЭ. Сегодняшний опыт позволяет несколько скорректировать существующие подходы по применению РЗА на объектах с ВИЭ.

Анализ решений для защит линий, отходящих от подстанции с ВЭС/СЭС

Сегодня из всех защит с абсолютной селективностью, применяемых для защиты ЛЭП с ВИЭ, в классическом варианте наиболее часто используется дифференциальная защита линии (ДЗЛ) при наличии вдоль линии проложенной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), или на линиях, оборудованных

ВЧ-каналами, – направленная высокочастотная защита (НВЧЗ). Дифференциально-фазная защита на таких линиях в силу специфики работы органа манипуляции на объектах с ВИЭ нельзя применять, а защиты в ВЧ-блокировкой могут быть использованы наряду с НВЧЗ, т. к. имеют очень схожие с НВЧЗ алгоритмические принципы реализации. Ниже рассмотрены режимы и схемы сети, при которых на ЛЭП с ВИЭ возможны отказы или неселективная работа защиты.

Дифференциальная защита линий с ВИЭ

ЛЭП, отходящие от подстанций с ВЭС/СЭС, как правило, имеют множество ответвленных подстанций. Как следствие, защиты таких энергообъектов имеют низкую чувствительность к аварийным токам [3]. Алгоритм работы комплекта ДЗЛ, установленного на подстанции с ВЭС/СЭС, в режиме внутреннего КЗ должен быть отстроен от суммарного тока нагрузки. При применении ДЗЛ на ЛЭП с ВИЭ в качестве информационных параметров в измерительных органах могут быть рекомендованы аварийные значения токов I_1^{ab} прямой последовательности для отстройки от симметричных повреждений и токи обратной последовательности I_2 для реагирования на несимметричные повреждения. При этом нецелесообразно использование пофазного сравнение токов, что является основным алгоритмическим принципом ДЗЛ для ЛЭП без ВИЭ, из-за недостаточной информативности токов с подстанции с ВИЭ. Вместо этого рекомендуется перейти на сравнение токов ДЗЛ по прямой и обратной последовательностям.

Направленная высокочастотная защита линий с ВИЭ

Преимущества НВЧЗ (относительная простота и высокое быстродействие) являются основными доводами по использованию защиты на ЛЭП с ВИЭ. Однако анализ применения НВЧЗ показывает, что защита может быть эффективна в транзитных режимах, когда в линии ток от ВИЭ относительно мал. Для варианта с тупиковой реализацией станций ВИЭ в энергосистеме НВЧЗ без алгоритмических доработок практически не применим. Если при внешних КЗ защита сможет отработать селективно, то при КЗ на защищаемой линии возможен не только отказ НВЧЗ со стороны подстанции с ВИЭ, но и блокировка срабаты-

вания полукомплекта защиты со стороны питающей подстанции. Алгоритм работы НВЧЗ для обеспечения селективности предполагает, что при появлении возмущения в энергосистеме от пусковых органов любого из полукомплектов защиты мгновенно блокируется защита линии. Постепенное снятие блокировки происходит после срабатывания реле направления мощности обратной последовательности (РНМОП) своего полукомплекта при выявлении им КЗ «спереди» и направлении аварийной мощности обратной последовательности от линии в шины. Из-за того, что в режиме КЗ токи от ВИЭ меняются мало, защита может не деблокироваться с полукомплекта данной подстанции.

Таким образом, для защиты ЛЭП в классическом варианте может быть использована только ДЗЛ.

Максимальная токовая защита и токовая защита нулевой последовательности.

Рассматривая защиты, где в качестве основного информационного параметра применен ток, протекающий в месте установки защиты (МТЗ, ТЗНП), следует отметить, что их классическое применение с реле максимального действия не может быть реализовано на линиях, отходящих от ВЭС и СЭС, т.к. ток подпитки КЗ со стороны ВИЭ в значительной степени зависит от стратегии управления инверторным преобразователем. Это означает, что предсказать характер изменения токов в повреждённых и неповреждённых фазах при КЗ в зоне действия ступени защиты невозможно.

Возможности применения адаптивных защит линий [7] также ограничены из-за соизмеримых величин аварийных составляющих в повреждённых и неповреждённых фазах, при КЗ в зоне действия ступени защиты.

Токовые защиты нулевой последовательности применяются для защиты ЛЭП от КЗ на землю и включаются на токи и напряжения нулевой последовательности. Токовые защиты нулевой последовательности согласно [8] должны иметь орган направления мощности (ОНМ) нулевой и (или) обратной последовательности. Заметим, что работа ОНМ, использующего токи обратной последовательности, может оказаться некорректной ввиду того, что эти токи подавляются инвертором.

В общем случае применения ТЗНП можно выделить 2 направления:

- нейтральные выводы силовых трансформаторов связи с сетью разземлены. В этом режиме ТЗНП практически не применима из-за не определения направления на КЗ при внутренних повреждениях, т.е. будет отсутствие селективности действия;

- трансформаторы на подстанции с ВИЭ работают с эффективно-заземленным нейтральным выводом. ТЗНП в таком режиме будет эффективной и селективно определять однофазные КЗ ($K^{(1)}$), а при достаточной чувствительности и двухфазные КЗ на землю ($K^{(1,1)}$).

Дистанционная защита. В реле сопротивления дистанционной защиты вычисление сопротивления до места КЗ выполняется в зависимости от определения вида повреждения и поврежденных фаз. Поскольку в алгоритмах решения этих задач могут использоваться симметричные составляющие, то, с учетом рассмотренного выше влияния инверторов на токи и напряжения в переходном процессе, результат решения может оказаться некорректным.

Таким образом, говоря о защитах с относительной селективностью для линий 110 кВ и выше с ВИЭ на базе инверторных преобразователей, следует отметить, что в классическом исполнении все они основываются на токовых информационных параметрах, которые в аварийных режимах не несут достаточной информации для принятия конкретного решения алгоритмом РЗ. Поэтому следует искать иные решения, основывающиеся в первую очередь на использовании в качестве основного информационного параметра – напряжения сети.

Схемные решения для защит линий, отходящих от подстанции с ВЭС/СЭС

В [2] был предложен вариант выполнения защиты линии с ответвительными подстанциями, соединяющей питающую под-

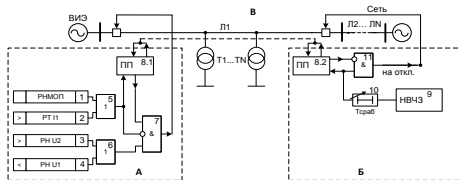


Рис. 2. Структурная схема защиты

Секция 1

станцию энергосистемы с подстанцией ВЭС, который по своей функциональности практически выполняет задачи защиты с абсолютной селективностью. Структурная схема защиты приведена на рис. 2, а ее поясняющая логическая часть, обеспечивающая селективную работу на ЛЭП с ВИЭ со стороны подстанции с ВЭС – на рис. 3.

Отключение со стороны ВЭС (рис. 2) производится по факту получения разрешающего ВЧ-сигнала («ВЧ Прием») от питающей ПС с контролем срабатывания ИО напряжения прямой U_1 или обратной U_2 последовательностей (рис. 3).

Блокирующий сигнал в линии формируется только при КЗ за спиной ВЭС. Направленность при КЗ за спиной ВЭС определяется РНМОП (рис. 2), который формирует (сигнал «ТЗНП РНМОПобр» на рис. 3) с контролем от U_2 и, для надежности, еще и модулем обратноподвижных реле сопротивления (РС) (рис. 3).

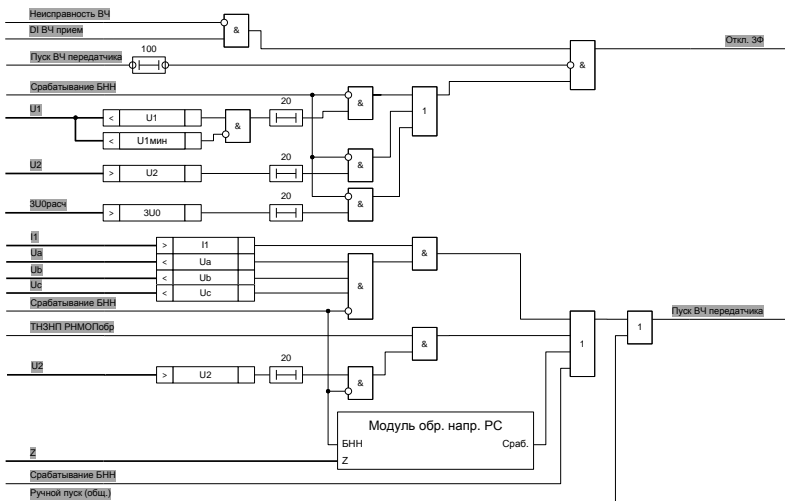


Рис. 3. Логика ВЧ-отключения со стороны ВЭС

Для выявления трехфазных КЗ за спиной подстанции с ВЭС дополнительно измеряется уровень тока прямой последовательности I_1 (рис. 2) и уровень фазных напряжений U_A , U_B , U_C (рис. 3). Если при КЗ измеренный ток на подстанции с ВЭС пре-

Секция 1

высил величину $1,1I_{ном}$ и при этом снизились все три фазных напряжения, то делается вывод о наличии трехфазного КЗ за спиной ВЭС.

Иной подход к формированию логической части защиты требуется для проектных решений при наличии заземленных трансформаторах на подстанции, подключенной к ВИЭ (рис 4). Поэтому в реализации проекта по схеме рис. 4 предполагается выдача отключающего сигнала со стороны питающей подстанции на подстанцию с включенной солнечной электростанцией. Одним из условий реализации проекта было использование НВЧЗ и существующих ИО этой защиты для защит ЛЭП. По проекту электрической связи между линиями нет. Схемные решения РЗА для проекта по рис. 4 приведены на рис. 5.

В продолжении развития алгоритмов защиты линий с абсолютной селективностью для объектов с ВИЭ предложены следующие доработки логики ВЧ-отключения НВЧЗ со стороны СЭС (рис. 5): – как и ранее было уже отмечено, из-за не информативности токов для таких линий со стороны слабого конца предлагается использовать отключающие ИО по напряжению прямой и обратной последовательностей, отключающее РС, а также ИО ТНЗНП;

– РНМОП выполняется направленным не в линию, а в шины и будет формировать блокирующий сигнал при КЗ «за спиной» («Пуск ВЧ-передатчика»);

– дополнительный сформированный отключающий сигнал от питающей подстанции энергосистемы посредством высокочастотного телеотключения (ВЧТО) будет передаваться на подстанцию с ВИЭ и контролироваться на стороне защит на подстанции СЭС измерительными органами напряжения U_1 , U_2 , от-

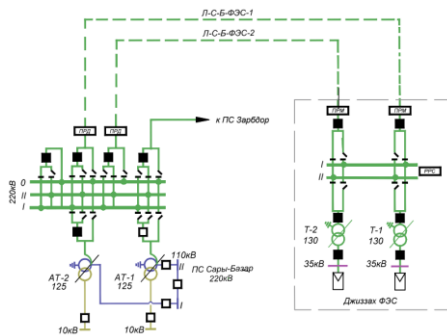


Рис. 4. Схема подключения СЭС большой мощности с заземленными трансформаторами связи

Секция 1

ключающего реле сопротивления РС_{откл} и направленной второй (третьей) ступенью ТЗНП. Для выявления несимметричных КЗ используется ИО U_2 . Для надежного реагирования на однофазные замыкания подключаются ступени ТНЗНП. Для выявления симметричных КЗ на линии используется отключающее РН U_1 с контролем от обратноподключенного блокирующего РС_{бл}:

– в НВЧЗ со стороны СЭС первоначальный пуск ВЧ-сигнала от блокирующих ИО запрещен.

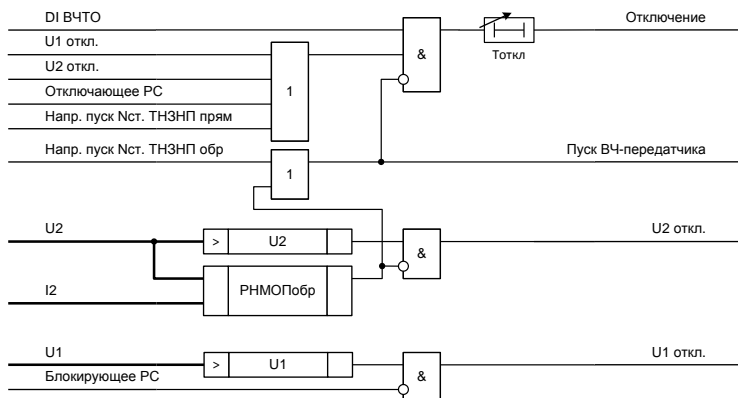


Рис. 5. Логика ВЧ-отключения со стороны СЭС

Анализ работы НВЧЗ показывает, что со стороны питающей подстанции защита работает в классическом традиционном варианте, а реагирование НВЧЗ с доработанной в соответствии с рис. 5 логикой ВЧ-отключения со стороны СЭС будет следующим:

а) режимы «КЗ за спиной»:

– при КЗ «за спиной» СЭС измеренных величин тока и напряжения достаточно для срабатывания отключающих ИО и, как следствие, обратноподключенного РНМОП, который запускает блокирующий сигнал со стороны СЭС на полукомплект питающей подстанции, тем самым блокируя отключение линии со всех сторон;

– при КЗ «за спиной» питающей подстанции тока будет недостаточно для отключающего органа тока и РНМОП. Отключения ЛЭП не произойдет;

б) режимы КЗ на защищаемой линии:

– при КЗ на линии в защите со стороны питающей подстанции величин тока и напряжения, а также прямонаправленного РНМОП, достаточно для отключения, а со стороны СЭС формирование команды на отключение может не быть. Пуска блокирующего сигнала со стороны СЭС также не будет. В этом случае происходит отключение линии со стороны питающей подстанции с одновременным посылом команды ВЧТО на другой конец. При приеме этого сигнала и срабатывании одного из реле напряжения или $PC_{откл}$ происходит отключение ЛЭП со стороны СЭС;

– если при междуфазном или трехфазном КЗ на линии вблизи питающей подстанции на полукомплексе НВЧЗ со стороны СЭС будет недостаточная чувствительность ИО напряжения $U_{откл} < U_{уст}$, то отключение в таком режиме со стороны питающей подстанции будет выполнено без задержек, а со стороны СЭС по истечению выдержки времени (на схеме не приведена).

Выводы

1. В работе проведён анализ проектных решений для подстанций с ВИЭ и особенностей функционирования РЗА в режимах КЗ на подключенных к подстанциям ВИЭ линиях.

2. На основе анализа информационных параметров с объектов с ВИЭ даны рекомендации по обеспечению селективной работы защит с абсолютной и относительной селективностью линий, отходящей от подстанций с ВИЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудин Р.И. Электроэнергия. Передача и распределение. Ежеквартальный выпуск №4 (27), декабрь 2022 – с. 40–44

2. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Петрушков М.Ю., Широкина Е.В. Особенности выполнения защит линий при наличии распределенной энергетики Релейная защита и автоматика энергосистем – 2021. Сб. докладов междунар. конф. и выст. Москва: ВДНХ, пав.№55, 2021. Стр. 335–348.

3. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Смирнов С.Ю., Таныгин С.А. Применение устройств РЗА для линий электропередач с возобновляемыми источниками электроэнергии Релейная защита и автоматика

Секция 1

энергосистем – 2023. Сб. докладов междунар. научн.- технич. конф. – Сочи / 2023.

4. *Pouyan Pourbeik, Gary Kobet. Impact of Inverter Based Generation on Bulk Power System Dynamics and Short-Circuit Performance / IEEE PES Report PES-TR68. 2018. 2018.*

5. *G. Molina Zubiri, S. Lopez Barba, I. De La Fuente Del Castillo – 21, rue d’Artois, F-75008 PARIS – B5_204_2010 (Сборник докладов конференции CIGRE 2010)*

6. IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents, <https://webstore.iec.ch/publication/24100>

7. *Ефремов В.А., Ефремов А.В., Таныгин С.А. Адаптивные уставки для реле ток и напряжения. Релейная защита. №01, март 2023.*

8. ГОСТ Р 58887–2020 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 110-220 кВ. Функциональные требования.

Авторы:

Ефремов Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, заместитель исполнительного директора по техническим вопросам ООО «Релематика». E-mail: efremov_va@relematika.ru.

Ефремов Алексей Валерьевич, аспирант кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, инженер департамента стратегического развития ООО «Релематика». E-mail: efremov_av@relematika.ru.

Петрушков Михаил Юрьевич, аспирант кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, ведущий инженер отдела инжиниринга проектов ООО «Релематика». E-mail: petrushkov_mi@relematika.ru.

Смирнов Сергей Юрьевич, аспирант кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, научный сотрудник Центра моделирования электроэнергетических систем ОАО «ВНИИР». E-mail: syusmirnov@vniir.ru.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Насибуллин А.Т., Акбулатова К.И., Макарова М.С.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск, Россия

***Аннотация.** В настоящее время наиболее актуальным вопросом является снижение нарушения электроснабжения ввиду применения устаревших устройств релейной защиты на электромеханической основе за счет применения адаптивных устройств релейной защиты. Применение адаптивных устройств позволяет повысить коэффициенты чувствительности и селективность работы за счет пересчета уставок релейной защиты при изменении режимов работы системы электроснабжения промышленного предприятия.*

***Ключевые слова:** адаптивная релейная защита, электроснабжение промышленных предприятий.*

Электроснабжение промышленных предприятий имеет сосредоточение мощных нагрузок на относительно малых площадях, где в основном применены линии снабжения небольшой протяженности и нет возможности применения автоматизированной релейной защиты с достаточным коэффициентом быстрого действия и необходимым уровнем селективности. В системах промышленного электроснабжения наблюдается рост аварийных ситуаций, когда устройства релейной защиты функционируют неправильно, вследствие применения аппаратов на старой компонентной базе. Для решения данной проблемы наилучшим подходом является пересмотр и перерасчет уставок, с применением адаптивной релейной защиты [1].

При разработке адаптивных уставок релейной защиты и автоматике, применяются два основных подхода:

— Полная автоматизация расчетов сети, которая выполняется на внешнем сервере, и на основе этих расчетов формируются уставки для автоматической записи их в устройства РЗА. Важным аспектом этого подхода является наличие информационных связей между подстанциями и отдельными элементами электрических систем, что позволяет повысить эффективность

расчетов, особенно при реконфигурации системы или после аварийных коммутациях в ней.

– Расчет уставок основывается на текущих значениях тока и напряжения, которые получаются непосредственно в терминале защиты. Этот подход позволяет формировать уставки на основе актуальных данных, обнаруживаемые в момент работы устройства релейной защиты.

В алгоритмах первого подхода для расчета защиты используются специальные вычислительные серверы вне устройства защиты, что создает сложности в получении текущих уставок при измерении в реальном времени. В дополнении к этому, для обеспечения связи между вычислительным сервером и устройством защиты требуются обеспечить надежные резервные каналы связи. Так же необходимо исключить влияние помех на эти каналы, возникающие при коммутации электрооборудования и предотвратить возможность несанкционированного доступа к вычислительному серверу.

Второй подход основан на том, что в качестве информационных параметров используются текущие и предыдущих значения фазных токов и напряжений, их симметрические и аварийные составляющие, измеренные на самом оборудовании. А параметры установившегося режима определяется методами математического моделирования [2].

При увеличении преобладания коротких линий электропитания на промышленной площадке, становится сложнее настроить систему их защиты, которая должна приспособливаться к различным рабочим условиям. Это можно сделать как путем непрерывной адаптации с помощью переключения групп предустановленных параметров, так и точной регулировкой параметров релейной защиты и ее чувствительности за счет адаптивных алгоритмов. Независимо от выбранного подхода, правильная работа и точная настройка защиты возможны только при постоянном синхронизированном измерении различных параметров самой сети или в ее узлах с последующей обработкой полученных данных в специализированном устройстве, контролирующем всю сеть и способном обрабатывать большие объемы информации. Когда возникает аварийная ситуация в данной се-

ти, такое устройство может определять тип и место повреждения, а затем отключать поврежденное оборудование [3].

Применение адаптивных алгоритмов является наиболее эффективным для оценки чувствительности и расчета уставок измерительных органов в системах дальнего резервирования и защиты от продольно-поперечной несимметрии в распределительных сетях различной конфигурации, где учитывают параметры нагрузочных режимов, нагрузки электродвигателей и емкостная проводимость. Они помогают выбрать правильные параметры срабатывания устройств релейной защиты. Создание информационных связей между подстанциями и отдельными элементами электрической системы предоставляет возможность повысить эффективность расчетов в таких ситуациях. Данный мониторинг состояния защищаемого объекта помогает улучшить его чувствительность, так как используется изменяющиеся параметры в аварийных ситуациях [4].

Расчет параметров срабатывания устройств релейной защиты производится за счет оценки величин корреляции сопротивления, тока и напряжения защищаемого объекта, на основе которых выполняется изменение значений в наблюдаемой зоне защиты в различных режимах работы системы электроснабжения [5].

Выводы

Таким образом, при применении адаптивного алгоритма расчета параметров режима работы системы электроснабжения и значений уставок срабатывания имеет преимущества за счет постоянного расчета нагрузочного режима, который способствует увеличению чувствительности систем защиты. Система защиты сможет более точно и оперативно реагировать на возникающие нагрузки и короткие замыкания, что в свою очередь повысит общую надежность электроснабжения. Эффективность применения адаптивных алгоритмов состоит в повышении надежности электроснабжения промышленных предприятий, которая достигается посредством секционирования и учета конфигурации сети в момент аварийных ситуаций, что позволяет снижает вероятность простоев и перебоев в электроснабжении промышленных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панова Е.А.* К вопросу о применении адаптивных устройств релейной защиты на подстанциях промышленных предприятий. / Е.А. Панова, А.Т. Насибуллин. – 2015. – №4 (540).

2. *Нагай В.В.* Адаптивная релейная защита от продольно-поперечной несимметрии распределительных сетей электроэнергетических систем / В.В. Нагай, В.Ф. Быкадоров, Ю.И. Жарков, Я.Л. Арцишевский. – 2004.

3. *Шарыгин М.В.* Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов, В. Ю. Вуколов, А.А. Петров. – 2020. – № 3.

4. *Ефремов В.А.* Адаптивные уставки для реле тока и напряжения / В.А. Ефремов, А.В. Ефремов, С.А. Таныгин. – 2023. – № 44.

5. *Ефремов В.А.* Устройство адаптивной дистанционной защиты линии электропередач / В.А. Ефремов, М.В. Мартынов, А.А. Гайдаш. – 2015.

Авторы:

Насибуллин Артем Тахирович, доцент, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова». Институт энергетики и автоматизированных систем, кафедра электроснабжения промышленных предприятий. E-mail: nasibullin.at@mail.ru.

Акбулатова Камила Ильшатовна, студентка, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова». Институт энергетики и автоматизированных систем, кафедра электроснабжение промышленных предприятий. E-mail: a_ki_ra@mail.ru.

Макарова Мария Сергеевна, студентка, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова». Институт энергетики и автоматизированных систем, кафедра электроснабжение промышленных предприятий. E-mail: maria.y.makarova2013@yandex.ru.

СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМИНАЛА РЗА НА ОСНОВЕ ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ

Петров С.В., Галанина Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы автоматизированного синтеза программного обеспечения терминала релейной защиты и автоматики. На основании описания предметной области в виде технического описания состава и функционала терминала релейной защиты и автоматики предлагается методика поэтапного разбора предметной области и синтеза объектно-ориентированного программного кода как основы для разработки внутреннего программного обеспечения терминала.*

***Ключевые слова:** объектно-ориентированный подход, ООП, релейная защита и автоматика, РЗА, МЭК-61850.*

В настоящий момент разработка ПО компонентов электро-технических комплексов и систем (ЭКС) ведётся в условиях постоянно меняющихся технических требований (ТТ) к системе. Это обуславливается различными требованиями к функционалу ПО различных заказчиков, различными требованиями руководящих и нормативных документов, непрерывным процессом переработки руководящих и нормативных документов отраслей (СТО), а также непрерывным процессом поддержания ПО в актуальном состоянии в течении его жизненного цикла ПО.

Рассмотрим процесс автоматизированного синтеза ПО с применением ООП [1] для терминала РЗА.

Предметной областью для моделирования и синтеза ПО является руководство по эксплуатации терминала РЗА, а именно раздел с перечнем и описанием защит и функций терминала. Для упрощения демонстрации процесса синтеза ПО терминала, структура защит и функций терминала (предметная область) редуцируется до максимальной токовой защиты (МТЗ) и защиты от дуговых замыканий (ЗДЗ).

Предметная область

МТЗ имеет три ступени: МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3. Каждая из ступеней представляет собой совокупность нескольких измерительных органов (ИО), объединенных общей логикой. Каждый

Секция 1

ИО МТЗ имеет независимую регулируемую уставку срабатывания и коэффициент возврата.

МТЗ-1 имеет особенность в виде возможности автоматического заглубления уставки на момент включения выключателя. Автоматическое заглубление уставки вводится при любых включениях выключателя при наличии соответствующего положения флага.

МТЗ-2 и МТЗ-3 могут быть выполнены как с зависимыми время-токовыми характеристиками срабатывания так и с независимыми.

МТЗ-2 и МТЗ-3 имеют возможность автоматического ускорения срабатывания при включении выключателя с уставкой времени срабатывания. Ускорение ступеней МТЗ-2 и МТЗ-3 вводится автоматически при любых включениях выключателя при наличии соответствующего флага.

Срабатывание реле тока МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3 формируют сигнал «Пуск МТЗ», который может быть задействован в работе ЗДЗ. В работе ЗДЗ сигнал «Пуск МТЗ» используется для исключения излишних срабатываний защиты при срабатывании оптического датчика дуговой защиты.

ЗДЗ принимает внешний дискретный сигнал от устройства дуговой защиты, реагирующего на различные физические явления, сопровождающие дуговые замыкания.

Для увеличения надёжности и отстройки от ложных срабатываний применяется контроль протекания тока короткого замыкания, данная возможность может быть выведена с помощью соответствующего флага. «Контроль тока ЗДЗ» осуществляется по наличию следующих событий: пуск МТЗ ввода, наличие внешнего дискретного сигнала «Контроль тока».

ЗДЗ имеет две независимые выдержки времени на срабатывание.

ЗДЗ имеет сигнализацию о месте замыкания. Для этого используется дискретный вход «Сигнализация ЗДЗ». Для исключения ложных срабатываний цепи сигнализации в логике формирования сигнализации предусмотрена одноимённая выдержка времени на срабатывание.

Для автоматизированного синтеза программных моделей сущностей синтезируемые элементы ПО должны удовлетворять

требованиям к наборам функций [2], атрибутов [3] и связей между сущностями [4, 5, 6].

Результатом процесса автоматизированного синтеза ПО является набор сущностей, построенных в соответствии с парадигмами ООП [4, 5, 6], имеющих строго определённую структуру и состав элементов которых удовлетворяет требованиям [2, 3]. Другими словами итогом синтеза ПО является набор семантически связанных атрибутов (простых и/или составных), описание поведения сущности и оформление связей с другими сущностями [5, 6].

Первый этап анализа рассматриваемой предметной области даёт следующие сущности: МТЗ; МТЗ-1; МТЗ-2; МТЗ-3; ЗДЗ.

Отношения между сущностями выстраиваются в следующем виде:

- МТЗ агрегирует МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3;
- МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3 имеют общие свойства и различия, это порождает новую сущность — МТЗ-Базовый;
- МТЗ ассоциируется с ЗДЗ (МТЗ сигнализирует о своём срабатывании ЗДЗ).

Второй этап анализа рассматриваемой предметной области определяет поведение моделируемых сущностей – интерфейсы найденных на предыдущем этапе сущностей [2]. Интерфейсы определяются вниз по иерархии сущностей – от базовых сущностей к дочерним.

При этом для сущностей со связями агрегации интерфейсы агрегируемых сущностей транслируются в агрегирующую сущность, т.к. доступ к ним осуществляется только через нее. Трансляция интерфейса обусловлена одним из принципов ООП – сокрытием данных [5, 6], что соответственно требует интерфейс для доступа к содержимому сущности. В случае, если сокрытия данных не требуется и агрегируемые сущности могут быть открытыми атрибутами, трансляция интерфейса не обязательна.

На этом этапе реализуется связь между сущностями типа наследование. Принцип наследования заключается в обобщении и разделении поведения сущностей. Т.е. синтезируются сущности с базовым интерфейсом, а частности поведения выносятся на следующий уровень сущностей. Таким образом, все, что объ-

единяет сущности, выносятся в базовые сущности. Все различия между схожими сущностями в дальнейшем реализуются наследниками.

Третий этап анализа рассматриваемой предметной области определяет состав сущностей – их атрибуты [2]. Наполнение атрибутами сущностей осуществляется вниз по иерархии сущностей. При наполнении сущностей атрибутами отношение агрегации значения не имеет, т.к. ООП абстрагирует сущности [5, 6] и позволяет не заботиться о реализации сущности, достаточно знать только её поведение.

Четвёртый этап анализа рассматриваемой предметной области синтезирует основы ПО терминала РЗА. На основании синтезированных сущностей строится модель предметной области – создаются экземпляры сущностей. Для примера предложенной предметной области строятся следующие сущности:

- 1 экземпляр МТЗ: содержит 1 экземпляр МТЗ-1, 1 экземпляр МТЗ-2, 1 экземпляр МТЗ-3 (МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3 содержат простые атрибуты в соответствии с предметной областью, наследуют МТЗ-Базовый);
- 1 экземпляр ЗДЗ, имеет интерфейс для МТЗ.

Выводы

На основании объектно-ориентированных парадигм, предложена методика автоматизированного синтеза ПО компонентов ЭКС. Методика состоит из последовательных этапов. На каждом этапе происходит анализ предметной области и синтезируется элемент будущих программных сущностей. Результат выполнения этапа является основой для следующего этапа. При необходимости все этапы последовательно могут быть повторены. Таким образом, в результате выполнения автоматизированного синтеза ПО получена структура программной модели компонента ЭКС. Она имеет все преимущества ПО, разработанного по принципам ООП и может быть применена для реализации модели устройства по МЭК61850 [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Буч Г., Максимчук Р., Энгл М.У., Янг Б.Д., Коналлен Д. Хьюстон К.А. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с

Секция 1

примерами приложений, 3-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. – 720 с.

2. Галанина Н.А., Петров С.В. Свойства и требования к функциям программных моделей электроэнергетических объектов, реализованных по МЭК 61850. Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр.: Чуваш. Гос. Ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2023. С. 187–194.

3. Галанина Н.А., Петров С.В. Требования и свойства атрибутов объектных моделей, спроектированных с применением ООП. Материалы VI Международной научно-технической конференции: Чебоксары: 2022 с.

4. Страуструп Б. Язык программирования C++. Четвёртое издание. – М.: Бином, 2023. – 1216 с.

5. Weisfeld Matt A. The object-oriented thought process / Matt Weisfeld. – 3rd ed. – Printed in the United States of America, 2008. – 347 p.

6. Wiener R. Fundamentals of OOP and data structures in Java / R. Wiener, L. Pinson. – Cambridge University Press. – 508 p.

7. СТО 56947007-25.040.30.309-2020. Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС».

Авторы:

Петров Сергей Викторович, аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: eight@bk.ru.

Галанина Наталия Андреевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: galaninacheb@mail.ru.

РАСЧЕТ ТОКОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ НАРУШЕНИЯХ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Кондрашова Ю.Н., Снигур А., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Безбородов М.А. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

***Аннотация.** В настоящее время потребление электроэнергии растёт, а следовательно, необходим ввод новых мощностей в энергосистему. Но ввод новых мощностей требует переоценку технических параметров сети. Благодаря выполнению оценки изменений можно выделить места, требующие детального расчёта при новых параметрах и проверку необходимого электрооборудования.*

***Ключевые слова:** аварийные режимы, конфигурация сети, трехфазное короткое замыкание.*

Аварийные режимы работы характеризуются резким изменением технических параметров сети, таких как частоты, тока и напряжение, при переходе состояния системы из одного состояния в другое. Одним из самых серьезных аварийных режимов является короткое замыкание, которое может нарушить работу энергосистемы в целом. Поэтому одной из важнейших задач электросетевого комплекса является обеспечение нормальной и надёжной работы энергетической системы, которая характеризуется параметрами, близкими к номинальным значениям.

Поэтому при изменении конфигурации сети, а также увеличении числа собственных источников генерации важно произвести оценку изменений технических параметров сети в режимах работы энергетической системы и проанализировать влияние на сохранение устойчивости синхронных генераторов при внезапных значительных нарушениях (трехфазное короткое замыкание). Полученные результаты позволят выделить наиболее подвергшиеся к изменениям участки сети и провести глубокий анализ.

Были рассмотрены 4 варианта конфигурации сети Магнитогорского энергетического узла (МЭУ):

1 вариант – Действующая схема МЭУ;

2 вариант – Схема с предусмотренной реконструкцией турбогенераторов на ЦЭС;

Секция 1

III вариант – Схема при вводе новой электростанции;

IV вариант – Схема и с реконструкцией ЦЭС и вводом новой электростанции.

С учетом работы коммутационных аппаратов и токоведущих частей был выполнен расчёт значений токов короткого замыкания в начальный момент времени для рассматриваемых вариантов схем Магнитогорского энергетического промышленного узла при коротких замыкания на сборных шинах системных и узловых подстанций. Точками короткого замыкания были выбраны сборные шины на различные уровни напряжения. Результаты представлены в таблице.

Таблица

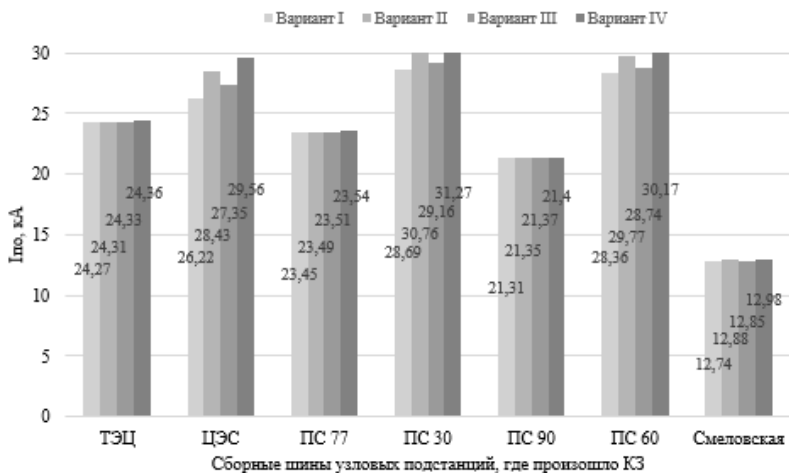
Токи периодической составляющей в начальный момент времени при внезапных нарушениях на секциях шин в различных токах МЭУ

	Точка КЗ	$I_{по}, \text{кА}$			
		I вариант	II вариант	III вариант	IV вариант
ТЭЦ	110 кВ	24,27	24,31	24,33	24,36
ЦЭС	110 кВ	26,22	28,43	27,35	29,56
ПС Смеловская	500 кВ	22,22	22,4	22,28	22,45
	220 кВ	27,37	27,86	27,53	28,01
	110 кВ	12,74	12,88	12,85	12,98
ПС Магнитогорская	500 кВ	24,83	25,04	24,89	25,1
	220 кВ	36,43	36,97	36,6	37,14
ПС 77	220 кВ	17,69	17,77	17,75	17,82
	110 кВ	23,45	23,49	23,51	23,54
ПС 30	110 кВ	28,69	30,76	29,16	31,27
ПС 90	220 кВ	21,21	21,32	21,28	21,38
	110 кВ	21,31	21,35	21,37	21,4
ПС 60	110 кВ	28,36	29,77	28,74	30,17
ПС 86	220 кВ	24,77	25,14	24,91	25,27

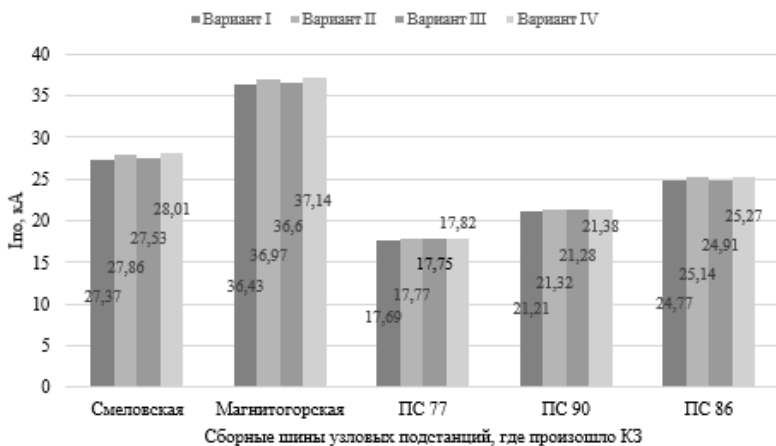
Для наглядной оценки изменения токов периодической составляющей в начальный момент времени при внезапных нару-

Секция I

шениях на секциях шин в различных точках Магнитогорского энергетического узла в зависимости от конфигурации сети были построены гистограммы (рисунок) для $U_{ном} = 110$ кВ и $U_{ном} = 220$ кВ.



a



б

Гистограммы

Выводы

Исходя из полученных результатов можно заметить, что наибольшие изменения наблюдаются на напряжении 110кВ. Поэтому данный уровень напряжения требует более детального перерасчёта. А именно, для обеспечения нормальной и надежной работы энергетической системы необходимо провести проверку электрооборудования, установленного на центральной электростанции, по условиям динамического действия токов короткого замыкания, также необходимо скорректировать уставки релейной защиты с целью повышения точной и надежной ее работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондрашова, Ю. Н.* Повышение устойчивости заводских электростанций при отделении от энергосистемы в результате внезапного короткого замыкания, сопровождающегося небалансом мощностей / Ю. Н. Кондрашова, О. В. Газизова, Е. Ф. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 97-106.

1. *Гуревич Ю. Е.* Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография [Текст] / Ю. Е. Гуревич, П. В. Илюшин. – Н. Новгород: НИ РАНХиГС, 2018. – 280 с.

1. *Дзюба, А. П.* Совершенствование управления энергоснабжением промышленных предприятий в условиях развития систем распределенной генерации / А. П. Дзюба, А. В. Семиколенов // Экономический вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2022. – № 2(14). – С. 49-63. – EDN TVLPIY. Концепция цифровая трансформация 2030 [Электронный ресурс] / Режим доступа https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. – Загл. с экрана.

Авторы:

Кондрашова Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорского государственного технического университета (МГТУ) им. Г.И. Носова. E-mail: rotjuil720@mail.ru.

Снигур Артем, бакалавр Института энергетики и автоматизированных систем (ИЭиАС) МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: artem_snigur@mail.ru.

Шалимов Алексей Витальевич, магистр Института энергетики и автоматизированных систем (ИЭиАС) МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: shalimov-alexey@mail.ru.

Третьяков Андрей Максимович, магистр Института энергетики и автоматизированных систем (ИЭиАС) МГТУ им. Г.И. Носова.
E-mail: andreyt2001@yandex.ru.

Безбородов Максим Андреевич, бакалавр Института энергетики и автоматизированных систем (ИЭиАС) МГТУ им. Г.И. Носова.
E-mail: maks_bezborodov@list.ru.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ ПО РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Кондрашова Ю.Н., Снигур А., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Безбородов М.А., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Аннотация. Снижение напряжения негативно влияет на устойчивость энергосистемы при возникновении внезапных нарушениях, поэтому оценка остаточного напряжения является актуальным вопросом. Целью данного исследования является оценка и расчет критических значений остаточных напряжений для определения минимального напряжения по неправильной отработке устройств релейной защиты для ответственных механизмов.

Ключевые слова: остаточное напряжение, устойчивость, реактивная мощность, коэффициент загрузки.

Одним из наиболее важных показателей устойчивости энергосистемы при возникновении внезапных нарушений является остаточное напряжение. Так как при просадках на 30 % и более даже при небольших реактивных сопротивлениях могут привести к опрокидыванию двигателей, т.е. их полной остановке и значительном потреблении реактивной мощности. При неправильной отработке защиты минимального напряжения приводит к тяжелому процессу – лавине напряжения.

Основными её причинами являются отказы генераторов, синхронных компенсаторов, конденсаторов или крупных ЛЭП. Из-за разделения энергосистемы на несинхронизированные части одновременно с лавиной частоты возникает сопутствующая лавина напряжения. Значительные провалы напряжения, возни-

Секция 1

кающие в результате сопутствующей лавины напряжения, могут привести к сбоям в частотной автоматике и привести к нарушению устойчивости потребителей для собственных нужд или полному отключению всей системы объекта.

Поэтому крайне важно оценить величину остаточного напряжения в режиме короткого замыкания, как одного из наиболее тяжелых аварийных режимов, с сопутствующей сильной просядкой напряжения. Для оценки был рассмотрен Магнитогорский энергетический узел (МЭУ) с различными коэффициентами загрузки по реактивной мощности. В таблице представлены параметры, взятые для расчёта остаточного напряжения для МЭУ.

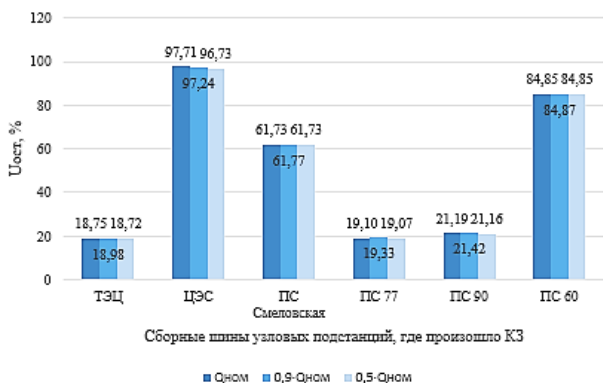
Таблица

Загрузка генераторов по реактивной мощности МЭУ

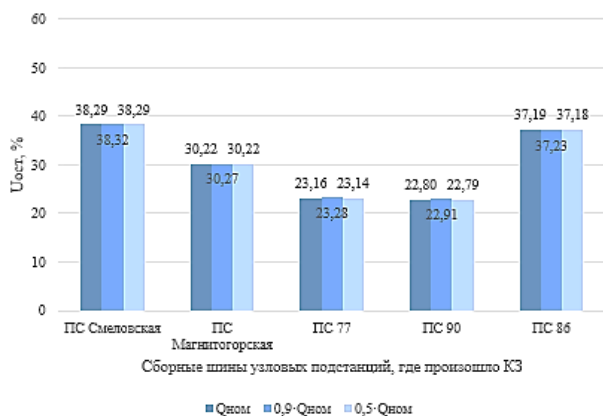
	Наименование генератора	$P_{\text{ном}}$, МВт	$Q_{\text{ном}}$, МВар	$0,9Q_{\text{ном}}$, МВар	$0,5Q_{\text{ном}}$, МВар
ТЭЦ	ТГ-1	50	37,5	33,75	18,75
	ТГ-2	50	37,5	33,75	18,75
	ТГ-3	50	37,5	33,75	18,75
	ТГ-4	60	45	40,5	22,5
	ТГ-5	60	45	40,5	22,5
	ТГ-6	60	45	40,5	22,5
ЦЭС	ТГ-1	12	9	8,1	4,5
	ТГ-2	12	9	8,1	4,5
	ТГ-3	40	30	27	15
	ТГ-4а	6	4,5	4,05	2,25
	ТГ-4б	6	4,5	4,05	2,25
	ТГ-5	25	18,75	16,875	9,375
	ТГ-8	40	30	27	15
	ТГ-6*	50	37,5	33,75	18,75
Перспективная	ТГ-1	50	37,5	33,75	18,75
	ТГ-2	50	37,5	33,75	18,75
ПВЭС-1 (ПС 7)	ТГ-1	6	4,5	4,05	2,25
	ТГ-2	4	3	2,7	1,5
ПВЭС-2 (ПС25)	ТГ-1	30	22,5	20,25	11,25
	ТГ-2	30	22,5	20,25	11,25
	ТГ-3	12	9	8,1	4,5
	ТГ-4	30	22,5	20,25	11,25

Секция 1

Исходя из этих данных был выполнен расчёт остаточных напряжений. Для наглядности результаты были сформированы в гистограмму (рисунок).



a



б

Изменение $U_{ост}$ на сборных шинах 110 кВ (а) и 220 кВ (б) при ТКЗ на сборной шине 110 кВ ПС 30, %

По построенным диаграммам можно сделать вывод, что влияния коэффициента загрузки по реактивной мощности на величину остаточного напряжения при внезапном значительном нарушении в меньшей степени влияет на сборные шины 220 кВ. Так, например, при КЗ на ПС 30 остаточное напряжение для

рассматриваемых случаев по загрузке реактивной мощности на сборных шинах узловой ПС 90 110 кВ в среднем изменилось на 0,11 %, а на с.ш. 220 кВ – на 0,05 %, на ПС 70 с.ш. 110 кВ в среднем изменилось на 0,11 %, на с.ш. 220 кВ – на 0,06 %.

Выводы

Наибольшее влияние, из рассмотренных объектов МЭУ, на систему электроснабжения оказывают влияние ЦЭС и ПС 30. Также были зафиксированы точки, в которых, при внезапном значительном нарушении, наблюдается снижение напряжения более чем на 30%, причём эти точки сохраняются в любых случаях. Исходя из вышеперечисленного особое внимание при исследовании поведения генераторов необходимо провести при различных родах возмущений на сборных шинах 110 кВ системных и узловых подстанций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондрашова, Ю. Н.* Повышение устойчивости заводских электростанций при отделении от энергосистемы в результате внезапного короткого замыкания, сопровождающегося небалансом мощностей / Ю. Н. Кондрашова, О. В. Газизова, Е. Ф. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 97-106.

2. *Гуревич Ю. Е.* Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография [Текст] / Ю. Е. Гуревич, П. В. Илюшин. – Н. Новгород: НИ РАНХиГС, 2018. – 280 с.

3. *Дзюба, А. П.* Совершенствование управления энергоснабжением промышленных предприятий в условиях развития систем распределенной генерации / А. П. Дзюба, А. В. Семиколенов // Экономический вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2022. – № 2(14). – С. 49-63. – EDN TBLPIY. Концепция цифровая трансформация 2030 [Электронный ресурс] / Режим доступа https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. – Загл. с экрана.

Авторы:

Кондрашова Юлия Николаевна, см. стр. 201.

Снигур Артем, см. стр. 201.

Шалимов Алексей Витальевич, см. стр. 201.

Третьяков Андрей Максимович, см. стр. 202.

Безбородов Максим Андреевич, см. стр. 202.

II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ В МИНИ-ТЭЦ ЗА СЧЕТ НАДСТРОЙКИ КОТЛА КВ-ГМ-100 ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКОЙ

Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Туманов Ю.А.,
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Исследуется возможность повышения эффективности работы котельной за счет надстройки водогрейного котла КВГМ-100 газотурбинной установкой по сбросной схеме.

Ключевые слова: отопительная котельная, водогрейный котел КВГМ-100, когенерация, газотурбинная установка, горячее водоснабжение, технико-экономические показатели.

Указом Президента РФ от 04.06.2008 г. №889 была поставлена задача по снижению энергоемкости ВВП страны на 40 % к 2020 году по сравнению с базовым 2007 годом, которая не была достигнута и снижение энергоемкости ВВП составило всего 15 % [1.] Известно, что наиболее энергоемкой отраслью является электроэнергетика и производство тепловой энергии на долю которых в 2021 году приходилось 27,4 % от совокупного потребления топливно-энергетических ресурсов (887,7 млн. тонн условного топлива). В [1] также отмечается недостаточное использование потенциала когенерации в сфере теплоснабжения несмотря на ее высокую эффективность.

Согласно прогнозу развития отраслей ТЭК и стратегии развития энергетики России до 2035 года [2, 3] одним из перспективных направлений повышения эффективности в энергетике нашей страны является внедрение когенерационных установок малой мощности на основе ГТУ и газопоршневых установок (ГПУ) в районных и промышленных котельных для их перевода в режим когенерации. Это позволит увеличить в стране до

50 ГВт установленной электрической мощности с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии. Внедрение когенерационных установок позволяет экономить потребление первичного топлива до 40 % и уменьшить воздействие вредных продуктов сгорания на окружающую среду и поэтому является приоритетным направлением развития энергетики. Это согласуется с целевыми показателями комплексной программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности по снижению энергоемкости ВВП на 35 % к 2035 году по сравнению с 2019 годом [1].

Целью работы является исследование возможности перевода котельной 4-С в режим когенерации за счет ее надстройки ГТУ со сбросом горячих продуктов сгорания в имеющийся штатный котел для полного обеспечения потребителей тепловой энергией на ГВС за счет утилизации тепла продуктов сгорания после ГТУ без дожигания дополнительного топлива.

В котельной 4-С установлены четыре водогрейных котла (2 ПТВМ-30М и 2 КВ-ГМ-100). Котельная работает круглогодично: в отопительный период используется температурный график 150 на 70°C со срезкой на 115°C и в работе могут находиться все котлы в зависимости от температуры наружного воздуха, а в межотопительный период в работе находится один котел ПТВМ-30М на ГВС. В качестве топлива в котельной используется природный газ Уренгойского месторождения с низшей теплотой сгорания $Q_{н}^c = 34694$ кДж/м³. Средняя потребляемая мощность электрической энергии на собственные нужды в течение года варьируется от 0,65 до 2,63 МВт. Горячее водоснабжение осуществляется преимущественно по открытой схеме, а часть по закрытой. С целью повышения эффективности и оптимизации использования котельного оборудования тепловых сетей в межотопительный период тепловые нагрузки котельных 5-С и 10М переключаются в котельную 4-С. Это приводит к увеличению среднесуточной подпитки до 170 т/ч, что примерно на 38 т/ч больше по сравнению с отопительным периодом. Для сглаживания суточного графика потребления сетевой воды, которая, например, в рабочий день в летний период (рис. 1) изменяется от 50 до 270 т/ч, установлены два бака аккумулятора с общим объемом 3000 м³. При

Секция 2

этом среднесуточная подпитка в рабочий день составляет 173 т/ч, что на 8 т/ч больше, чем в выходной или праздничный день.

На рис. 2 представлены зависимости изменения усредненной за 2017 и 2022 годы среднемесячной тепловой нагрузки и температуры холодной воды на подпитку. Видно, что среднемесячная максимальная тепловая нагрузка наблюдается в декабре и январе месяца, которая уменьшается до 18-20 Гкал/ч в межотопительный период. Причем в начале и в конце межотопительного периода тепловая нагрузка на ГВС почти на 3 Гкал больше, чем в июле и августе. Это объясняется повышением температуры холодной воды на подпитку, которая в августе имеет максимальное значение.

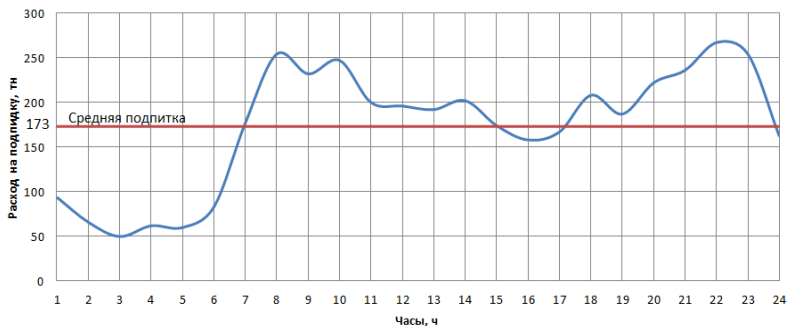


Рис. 1. Суточный график потребления сетевой воды в рабочий день в межотопительный период

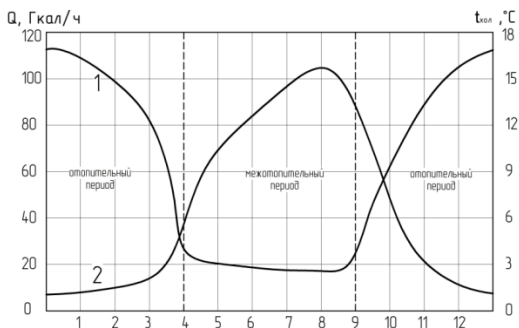


Рис. 2. Графики изменения усредненной за 2017 и 2022 годы среднемесячной тепловой нагрузки 1 и температуры холодной воды 2 на подпитку

Секция 2

Из приведенных результатов следует, что максимальная тепловая нагрузка за счет утилизации тепла выхлопных газов в котле-утилизаторе должна быть в пределах 20-21 Гкал/ч для полного удовлетворения потребителей ГВС без дополнительного сжигания природного газа в котле-утилизаторе. Из отечественных ГТУ наиболее близко этим условиям удовлетворяет ГТЭС-16 производства Пермский авиадвигатель с тепловой мощностью 20,4 Гкал/ч и расходом выхлопных газов за силовой турбиной 55,6 кг/с на номинальном режиме работы при температуре наружного воздуха 15 °С [4].

Таблица

Основные технические характеристики ГТЭС-16 и КВ-ГМ-100

Основные технические характеристики и параметры	ГТЭС-16	Основные технические характеристики и параметры	КВ-ГМ-100
Тепловая мощность на выхлопе при $t = 110^{\circ}\text{C}$, Гкал/ч (МВт)	20,4 (23,7)	Теплопроизводительность номинальная, Гкал/ч (МВт)	100 (116,3)
КПД: в простом цикле, % в когенерационном цикле, %	34,1 84,7	КПД котла на газе	93,2
Расход природного газа (при $\rho = 0,68 \text{ кг/м}^3$), $\text{нм}^3/\text{ч}$	4986,2	Расход природного газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$	12520
Коэффициент избытка воздуха	3,3	Коэффициент избытка воздуха	1,05
Температура газа при нормальных условиях, °С: перед турбиной на выхлопе	1209 495	Температура уходящих газов на природном газе, °С	138
Расход выхлопных газов за силовой турбиной, кг/с	55,6	Расчетное значение расхода дымовых газов, кг/с	51,66
Давление выхлопных газов при нормальных условиях, кгс/см^2	1,0732	Аэродинамическое сопротивление газового тракта, Па	1200

Из установленных в котельной котлов только котел КВ-ГМ-100 может быть использован в качестве котла-утилизатора, который рассчитан на работу с расходом дымовых газов 51,7 кг/с на номинальном режиме работы (таблица). Тип и мощность ГТУ выбирается из условия согласования котла и ГТУ по расходу дымовых газов для обеспечения скорости последних в газоходе и разрежения в топке требованиям завода-изготовителя котла. В данном случае превышение расхода дымовых газов в газоходе котла меньше 8 %, что согласуется с требованиями завода-изготовителя (не более 10–12 %). Возможность использования КВ-ГМ-100 подтверждается также водогрейным котлом КВ-ГМ-116,3-150ГТ производства ЗАО «Энергомаш-Белгород» с похожими техническими характеристиками с КВ-ГМ-100, кроме массогабаритных размеров, который специально разработан для работы по сбросной схеме с ГТЭС-16.

Котел КВ-ГМ-100 может работать в чисто утилизационном, комбинированном (с сжиганием дополнительного природного газа в среде выхлопных газов после ГТУ) и автономном режимах.

В утилизационном режиме тепловая мощность котла составляет 20,4 Гкал при температуре наружного воздуха 15°C и загрузке ГТУ в базовом режиме на номинальную мощность 16 МВт, что достаточно для обеспечения потребителей тепловой энергией на ГВС в межотопительный период (рис. 2). С повышением температуры воздуха до 25–30°C утилизируемая тепловая мощность снижается, но при этом пропорционально уменьшается и необходимая мощность на ГВС на 1–2 Гкал/ч из-за увеличения температуры холодной подпиточной воды.

Оценим максимальную тепловую мощность котла в комбинированном режиме работы с дополнительным сжиганием природного газа. Объем дымовых газов при сжигании 1 м³ природного газа к камере сгорания ГТУ при $\alpha = 3,3$ равняется $V_{д.г.} = 33,48$ м³. Содержание кислорода в выхлопных газах после ГТУ составляет 14,63% и, соответственно, для дополнительного сжигания 1 м³ природного газа в котле-утилизаторе в атмосфере выхлопных газов при $\alpha = 1,05$ необходимо иметь действительный объем $V_{д.дг}$ дымовых газов в количестве 14,59 м³. Следовательно, возможный максимальный расход природного газа, сжи-

Секция 2

гаемый в атмосфере выхлопных газов в котле-утилизаторе составляет $B_{KV} = 3,1 \text{ м}^3/\text{с}$. При сжигании такого количества газа в котле с учетом $\eta = 93,2\%$ и $Q_n^c = 34694 \text{ кДж/м}^3$ его тепловая мощность равняется $N_T = B_{KV} \cdot Q_n^c \cdot \eta = 100,24 \text{ МВт}$ (86,2 Гкал/ч). Суммарная тепловая мощность котла без использования дутьевых вентиляторов с учетом теплоты утилизируемых выхлопных газов ГТУ составляет $N = N_T + N_{yT} = 106,6 \text{ Гкал/ч}$. Полученное значение суммарной мощности больше на 6,6 Гкал/ч паспортного значения котла КВ-ГМ-100. Тепловая мощность котла в данном режиме может варьироваться в диапазоне 50–100 Гкал/ч. При замене горелок и реконструкции АСУ диапазон регулирования мощности котла может быть расширен с 25 до 100 Гкал/ч [5].

Котел КВ-ГМ-100 может работать в автономном режиме без утилизации тепла дымовых газов во время обслуживания и ремонтах ГТЭС. В этом случае включаются штатные дутьевые вентиляторы и сжигание природного газа в топке котла осуществляется в атмосфере воздуха.

Стоит отметить, что рассматриваемый ГТЭС-16 обеспечивает наименьший расход условного топлива на выработку 1 кВт/ч электрической энергии среди аналогичных по мощности газотурбинных электростанций, что повышает ее конкурентоспособность в связи с постоянным ростом цен на первичное топливо.

Таким образом, результаты исследований показывают, что утилизация тепла выхлопных газов ГТУ, работающей в базовом режиме на номинальной электрической мощности, позволяет полностью обеспечить потребности в тепловой энергии на ГВС в межотопительный период без дополнительного дожига природного газа в котле-утилизаторе. В отопительный период имеется возможность увеличить тепловую мощность котла до паспортных значений за счет дополнительного сжигания природного газа в выхлопных газах ГТУ без применения дутьевых вентиляторов. Перспективным направлением дальнейшего использования когенерационных технологий для тепло- и электроснабжения удаленных населенных пунктов является вовлечение местных видов твердого топлива за счет их предварительной газификации и пиролиза [6–9].

Для модернизации котельной с применением газотурбинных технологий необходимо решить следующие задачи: размещение ГТУ, установка дожимного компрессора с узлом подготовки газа, подвод дымовых газов к горелкам, установку системы шиберов, позволяющей осуществить работу котла в различных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства РФ от 9.09.2023 г. №1473. Об утверждении комплексной государственной программы РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности». [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <http://www.static.qovernment.ru> (дата обращения 03.10.2023).
2. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://government.ru/docs/all/128340/> (дата обращения 03.10.2023).
3. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 03.10.2023).
4. Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. Часть 1. – ГТУ: Отчет; Некоммерческое партнерство «Российское теплоснабжение». – М. – 2004. – 127 с. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru> (дата обращения: 19.07.2023).
5. Жигурс А. Опыт АО «Ригас Силтумс» в реконструкции водогрейных котлов КВГМ-50 и КВГМ-100 / А. Жигурс, А. Церс, С. Плескачев // Новости теплоснабжения – 2009. – №4. – С. 34–39.
6. Султангузин И.А. Разработка технических решений для производства отечественных когенерационных установок с использованием технологий газификации и пиролиза местного твердого топлива / И.А. Султангузин, А.В. Федюхин, С.Ю. Курзанов, Т.А. Степанова, В.А. Тумановский // Промышленная энергетика – 2015. – №5. – С. 51–54.
7. Афанасьев В.В. Электротермическая газификация твердых топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, В.Н. Орлов // Современные проблемы науки и образования – 2015. – № 1–2. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19836> (дата обращения: 26.07.2023).

8. Афанасьев В.В. Исследование физико-химических свойств газификации местных видов топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.Н. Орлов, В.А. Тарасов // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 9–2. С. 227–232.

9. Афанасьев В.В. Математическое моделирование энергетических балансов процессов газификации твердого топлива / В.В. Афанасьев, В.А. Тарасов, В.Г. Ковалев // *Сборник: Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения*. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С.46–58.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1974 году физико-математический факультет Чувашского государственного университета. В 2004 году защитил докторскую диссертацию на тему «Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами». E-mail: avvteo@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1973 году окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1982 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Исследование электрических параметров многоэлектродных электрошлаковых печей». E-mail: espp21@mail.ru.

Краснов Евгений Вячеславович, аспирант факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: evgeni.krasnov.99@mail.ru.

Туманов Юрий Альбертович, старший преподаватель кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1982 году энергомашинно-строительный факультет Московского энергетического института. E-mail: ytumanov1959@gmail.com.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СРЕДЕ LOGO! SOFT COMFORT

Гусев Н.С., Охоткин Г.П., Васильева Л.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В данной статье разрабатывается алгоритм и программа работы схемы управления асинхронным двигателем. Программа разработана на языке FBD в среде LOGO! Soft Comfort. Тестирование программы подтвердило нормальную работу схемы управления асинхронным двигателем во всех режимах функционирования электропривода.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, реверс, LOGO! Soft Comfort, программируемые логические контроллеры, язык функциональных блоковых диаграмм.*

Введение

подавляющее большинство всей вырабатываемой электроэнергии России применяется для питания асинхронных двигателей (АД). В общепромышленных механизмах получили широкое применение релейно-контакторные схемы управления АД. Многие механизмы требуют реверсивный режим работы электродвигателя. Существуют различные схемы управления электроприводами, которые описаны в работах [1–3]. Типовая схема управления реверсивным асинхронным электроприводом (АЭП) приведена на рис. 1.

Силовая схема электропривода выполнена на автоматическом выключателе QF1, линейных контакторах KM1 и KM2, тепловых реле FR1 и FR2, асинхронном двигателе M с пристроенным датчиком скорости SR (электромеханическое реле контроля скорости). Реле контроля скорости замыкает свои открытые контакты SR(B) или SR(H) при скоростях асинхронного двигателя (АД) больших нуля на 10 %, т.е. при $|\omega| \geq 0,1\omega_n$. Контакт SR(B) реле контроля скорости замыкается при вращениях АД «Вперед», а SR(H) – «Назад».

Контактор KM1 обеспечивает вращение АД «Вперед», а KM2 – «Назад». Для реверсирования и торможения противо-

Секция 2

включением изменяются чередования фаз питающего напряжения путем перекидывания двух фаз А и С. Схема позволяет осуществить пуск, реверс и остановку электропривода с торможением в режиме противовключения. При этом, для исключения разгона АД в другую сторону, осуществляется контроль скорости и при скоростях близких к нулю выключается работающий контактор.

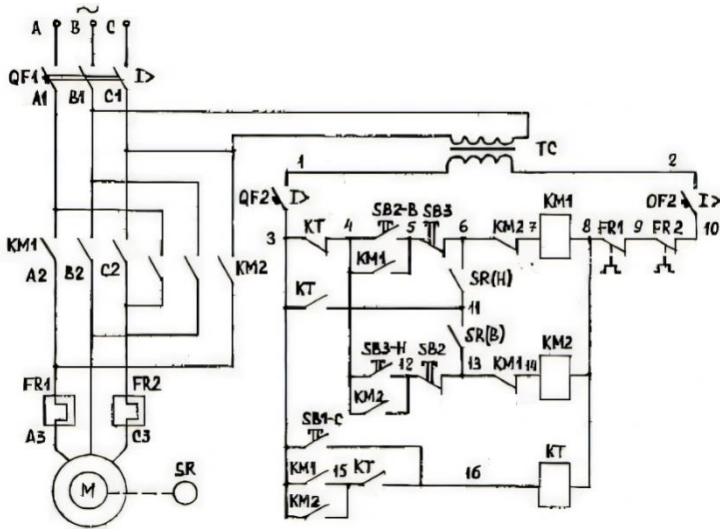


Рис. 1. Типовая схема управления АЭП

Схема управления (СУ) электроприводом содержит: автоматический выключатель QF2, трансформатор TC, кнопку управления «Вперед» с открытым контактом SB2-B и закрытым контактом SB2, кнопку управления «Назад» с открытым контактом SB3-H и закрытым контактом SB3, кнопку управления «Стоп» SB1-C, обмотки управления контакторов и вспомогательные контакты контакторов KM1 и KM2, контакты SR(B) и SR(H) реле контроля скорости, реле торможения KT и вспомогательные контакты тепловых реле FR1 и FR2. В кнопках управления «Вперед» и «Назад» конструктивно предусмотрено при нажатии кнопки вначале размыкание закрытых, а затем замыкание открытых контактов. Последовательно к обмоткам управле-

Секция 2

ния контакторов КМ1 и КМ2 включены их смежные вспомогательные закрытые контакты с целью предотвращения одновременного включения.

Включением автоматических выключателей QF1 и QF2 схема управления электроприводом переводится в рабочий режим. При нажатии кнопки управления «Вперед» обмотка контактора КМ1 подключается к питающему напряжению. При этом включается контактор КМ1 и через свои силовые контакты подключает АД к сети электроснабжения, одновременно с этим через свой вспомогательный контакт становится на самопитание. Так начинается разгон электродвигателя «Вперед». По мере разгона машины реле контроля скорости замыкает свой контакт SR(B), подготавливая цепь питания обмотки управления КМ2 для торможения АД противовключением, если будет нажата кнопка «Стоп» SB1-С. Далее, если не будет нажата никакая кнопка управления, двигатель М разгоняется до установившейся скорости.

При нажатии кнопки управления «Назад» сначала обмотка контактора КМ1 отключается от питания, а затем обмотка контактора КМ2 подключается к питающему напряжению. Контакт КМ2 включается и через свой вспомогательный контакт становится на самопитание. В силовой цепи электропривода происходит противовключение двигателя (магнитное поле АД вращается «Назад», а ротор по инерции вращается «Вперед»), который вначале интенсивно тормозится, а затем в двигательном режиме разгоняется «Назад» до установившейся скорости. В этом случае реле контроля скорости замыкает свой контакт SR(H), подготавливая цепь питания обмотки управления КМ1 для торможения АД противовключением, если будет нажата кнопка «Стоп» SB1-С.

При нажатии кнопки «Стоп» SB1-С срабатывает реле торможения КТ, которое своим нормально замкнутым контактом обесточивает обмотку управления контактора КМ2, и подключает к питанию обмотку управления контактора КМ1. Контакт КМ1 подключает АД в режим противовключения. В результате этого двигатель интенсивно тормозится. При скоростях близких к нулю размыкается контакт SR(H), отключается контактор КМ1 и АД от сети. Так происходит остановка асинхронной машины.

При модернизации алгоритмов управления АД релейно-контакторная схема требует изменения принципиальной электрической схемы, электрические аппараты схемы управления потребляют большое количество электроэнергии и имеют ограниченный ресурс. Поэтому замена релейно-контакторной схемы управления на программно-логическое устройство является актуальной задачей.

Цель работы

Разработка алгоритма и программы схемы управления реверсивным АЭП в среде LOGO! Soft Comfort [4]. Для достижения поставленной цели требуется разработать математическую модель работы типовой релейно-контакторной схемы, минимизировать логическую модель и составить программу.

Разработка математической модели

Математическая модель алгоритма работы схемы управления является логической функцией работы программируемого логического контроллера (ПЛК).

Согласно типовой релейно-контакторной схеме управления, составим логические функции работы контакторов КМ1, КМ2 и реле КТ. Для контактора КМ1 запишем:

$$KM1 = \left((\overline{KT} \wedge (SB2B \vee KM1) \wedge \overline{SB3}) \vee (KT \wedge SRH) \right) \wedge \overline{KM2} \wedge \overline{FR}, \quad (1)$$

где $\overline{FR} = \overline{FR1} \wedge \overline{FR2} \wedge \overline{QF2}$.

Теперь напишем для КМ2:

$$KM2 = \left((\overline{KT} \wedge (SB3H \vee KM2) \wedge \overline{SB2}) \vee (KT \wedge SRB) \right) \wedge \overline{KM1} \wedge \overline{FR}. \quad (2)$$

Работа реле контроля скорости АД описывается уравнением:

$$SRB = SRH = \begin{cases} 1, & \text{при } |\omega| \geq 0,1\omega_n; \\ 0, & \text{при } |\omega| < 0,1\omega_n. \end{cases} \quad (3)$$

И наконец, логическая функция работы реле торможения КТ имеет вид:

$$KT = \left(((KM1 \vee KM2) \wedge KT) \vee SB1C \right) \wedge \overline{FR}. \quad (4)$$

Составленные уравнения (1)–(4) являются математической моделью работы схемы управления АД. Далее по этим уравне-

ниям составляются алгоритм и программа работы схемы управления.

Разработка программы схемы управления АД

Программа на языке FBD представлена на рис. 2. При составлении программы использованы логические элементы «И», «ИЛИ» и «НЕ».

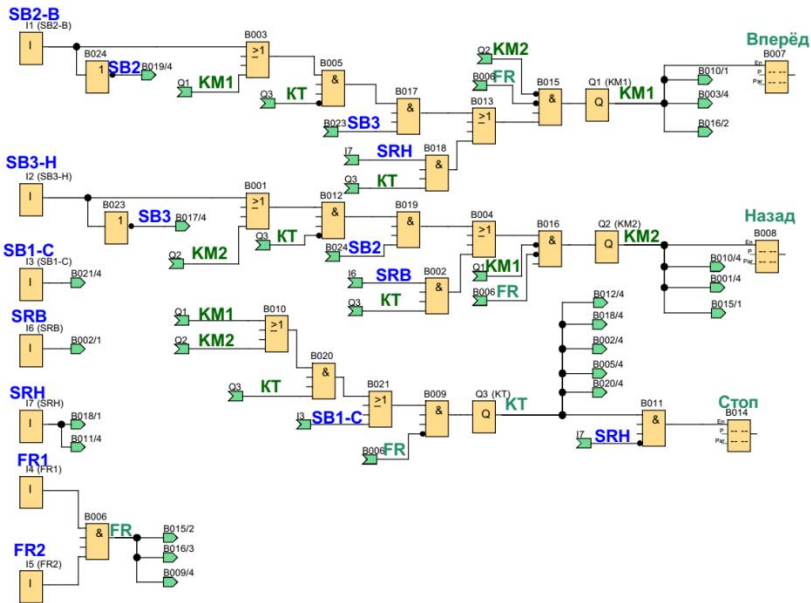


Рис. 2. Программа схемы управления АД

При тестировании программы работа контактов SRB и SRH реле контроля скорости имитируется вручную. Для удобства проверки работы программы на табло (Message texts) выведены состояния асинхронного двигателя: «Вперёд», «Назад» и «Стоп».

Выводы

1. Разработан алгоритм и программа управления реверсивным АЭП в среде LOGO! Soft Comfort.
2. Тестирование программы подтвердило нормальную работу схемы управления АД во всех режимах ее функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высш. шк., 1991. – 430 с.
2. Охоткин Г.П., Романова Е.С. Синтез логического устройства и распределителя импульсов САР тока. // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. – 2013. С. 194–203.
3. Охоткин Г.П. Анализ систем регулирования тока непосредственных преобразователей частоты. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1992. № 3. С. 66–70.
4. Программное обеспечение LOGO! Soft Comfort V6.0. Руководство по программированию LOGO! фирмы SIEMENS. – 280 с.

Авторы:

Гусев Никита Сергеевич, студент 4 курса факультета радиоэлектроники и автоматики. E-mail: alldrum@bk.ru.

Охоткин Григорий Петрович, см. стр. 86.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. Математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, 2000 г. Специальность 13.00.02 Теория и методика обучения и воспитания, 2015 г. E-mail: oln2404@mail.ru.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА
С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В КАЧЕСТВЕ
ОЧИЩАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ОТ ШЛАКОВ НА
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Абдуллина А.А., науч. рук. Зинуров В.Э., ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

***Аннотация.** В статье рассмотрены различные типы золоуловителей, позволяющих, снизить наносимый окружающей среде вред от шлаковых выбросов теплоэнергетических предприятий, также их достоинства и недостатки. В качестве альтернативного варианта в работе представлено сепарационное устройство с дугообразными элементами. Кратко описаны его принцип работы, а также результаты.*

Ключевые слова: теплоэнергетические предприятия, золоуловители, сепарационное устройство с дугообразными элементами, очистка газов.

При сгорании топлива различных видов в котельных установках, необходимых для подачи тепла или нужд производства, образуются твердые частицы (зола и шлак) в качестве побочного продукта. При попадании в окружающую среду данных включений вместе с горячими дымовыми газовыми выбросами происходит причинение значительного вреда как человеку, так и ей [окружающей среде]. Источниками таких колоссальных выбросов могут выступать сферы промышленности, например энергетика, в частности предприятия ТЭЦ, нефтегазоперерабатывающие предприятия, особенно при использовании нефтепродуктов невысокого качества, предприятия по утилизации твердых коммунальных и бытовых отходов, металлургия. Во избежание негативных последствий на предприятиях такого типа используют мокрые или сухие золоуловители, очищающие отходящие газы [1].

Золоуловитель – техническая установка циклического действия, назначение которой заключается в очистке газового потока от мелкодисперсных частиц, отходящих от водонагревательного котла или другого оборудования. По принципу действия различаются следующие типы золоуловителей: механические инерционные сухие, механические инерционные мокрые и электрические.

К первому типу относят следующие аппараты: жалюзийные золоуловители, рукавные фильтры, циклоны различного типа и пылесадительные камеры. Принцип работы данных устройств основан на действии инерционных и центробежных сил на мелкодисперсные частицы при прохождении газового потока через устройство. К их достоинствам можно отнести высокую степень очистки, порядка 90-99 %, от крупнодисперсных частиц, простой принцип работы. Получается, что применение таких типов золоуловителей рационально для предварительной очистки газов. Например, на котельных установках большой мощности используются жалюзийные золоуловители, которые как было ранее сказано обладают более высокой степенью очистки или

Секция 2

эффективностью. Важно отметить, что эти факторы влияют на конструкцию аппарата, чаще всего системы аппаратов, делая её более громоздкой.

К механическим инерционным мокрым золоуловителям относятся скрубберы (насадочные, полые, тарельчатые, барботажные) и золоуловители пруткового типа. Принцип их действия основан на прохождении очищаемого запыленного газового потока через жидкостную преграду. В отличие от сухих золоуловителей золоуловители мокрого типа подходят для очистки газов от мелкодисперсных частиц, размером более 1 мкм, а также процесс улавливания частиц может происходить при повышенных параметрах температуры и влажности. Так, на котлах небольшой и средней мощности применяются установки данного типа, однако степень очистки от зольных включений в таких системах меньше и составляет около 75–85 %.

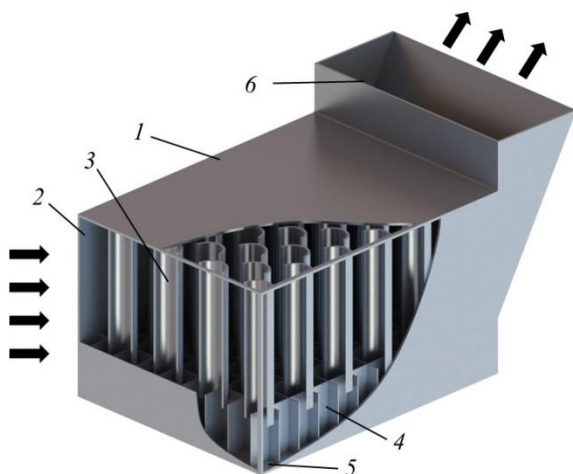
К последнему типу, электрическим золоуловителям, можно отнести электрофильтры. Работают они по следующему принципу: при прохождении запыленного газового потока в пространстве между электродами частицам сообщается заряд, далее они перемещаются в направлении электрода с противоположной полярностью заряда, где происходит их осаждение. Золоуловители такого принципа действия обладают эффективностью около 99 % практически вне зависимости от размеров улавливаемых частиц, следовательно, такие фильтры обладают высокой эффективностью тонкой очистки. Однако такие золоуловители подвержены быстрому забиванию фильтрующего материала, в следствие чего аппарат нуждается в постоянном контроле и извлечении от накопившегося шлака, а также дорог по сравнению с мокрыми и сухими.

Для улучшения работы предприятий, использующих золоуловители, автором данной работы предлагается использование сепарационного устройства с дугообразными элементами в качестве устройства, очищающего газовый поток от дымовых шлаков [2]. Конструкция данного устройства проста (рисунок), так как представляет собой несколько рядов дугообразных элементов, заключенных в корпус.

Принцип действия представленного устройства базируется на следующем: запыленный газовый поток поступает в устрой-

Секция 2

ство через входной патрубок, после чего сразу набегает на дугообразные элементы. Геометрическое расположение дугообразных элементов способствует возникновению высоких значений центробежной силы, которые выбивают запыленные частицы из газового потока. Далее частицы отскакивают от внутренних стенок устройства и осаждаются в пылесборном бункере, в то время как очищенный газовый поток продолжает своё движение и покидает сепарационное устройство через выходной патрубок. Некоторые частицы могут осесть на стенках устройства, поэтому необходима своевременная его очистка.



Вид с разрезом трехмерной модели сепарационного устройства с дугообразными элементами: 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – дугообразные элементы; 4 – сепарационная решетка; 5 – пылесборный бункер; 6 – выходной патрубок

Стоит отметить, что были проведены исследования [3–4], где выяснено, что данный прибор обладает эффективностью 80–90 % при очистке газового потока, содержащего как мелкодисперсные частицы (размер от 5 мкм), так и крупнодисперсные (размером до 200 мкм).

Выводы

Многие промышленные и теплоэнергетические предприятия, использующие в качестве сжигаемого сырья различные

твердые виды топлива, во избежание загрязнения окружающей среды побочными продуктами в виде золы и шлаков используют различные виды золоуловителей. По типу действия различают: сухие, мокры и электрические – каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. В качестве альтернативного варианта способа очистки газового потока представлено авторская разработка – сепарационное устройство с дугообразными элементами. Была описана его конструкция, принцип действия, а также результаты, которые говорят о возможности внедрения данного аппарата в эту область.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салахова, Э. И. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриева, А. А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41-46. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_8_41.

2. Патент на полезную модель № 219550 U1 Российская Федерация, МПК В01D 45/08. Устройство для очистки газа от твердых взвешенных частиц : № 2023114446: заявл. 01.06.2023 : опубл. 24.07.2023 / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». – EDN BGSIDG.

3. E.I. Salakhova, V.E. Zinurov, V.V. Kharkov, A.A. Abdullina, T.V. Pham, E3S Web of Conf., 389, 02018 (2023).

4. Зинуров, В.Э. Сравнение технических характеристик мульти-вихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 3. – С. 117 – 127.

Авторы:

Абдуллина Азалия Айратовна, студент кафедры «Экономика и организация производства» ФГБОУ ВО «КГЭУ». E-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com.

Зинуров Вадим Эдуардович, ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ В МИНИ-ТЭЦ

Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В, Серебрянников А.В., Туманов Ю.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Исследуется возможность повышения эффективности работы котельной за счет надстройки водогрейного котла ПТВМ-30М газотурбинной установкой. Проведены расчеты для обоснования выбора газотурбинной установки в качестве надстройки котла. Предложена схема надстройки котла с возможностью дополнительного сжигания природного газа в атмосфере выхлопных газов для увеличения тепловой мощности котла. Проведены оценочные расчеты технико-экономических показателей.*

***Ключевые слова:** отопительная котельная, водогрейный котел ПТВМ-30М, когенерация, газотурбинная установка, удельный расход топлива, технико-экономические показатели.*

В соответствии с Федеральным законом «О теплоснабжении» приоритетным направлением развития энергетики для энергоресурсосбережения является максимальная загрузка существующих ТЭЦ с паротурбинными установками на комбинированную выработку электрической и тепловой энергии, в том числе за счет перевода существующих районных отопительных и промышленных котельных в режим мини-ТЭЦ [1]. Актуальной является также строительство новых малых ТЭЦ на базе газотурбинных установок (ГТУ) и газопоршневых установок (ГПУ) для покрытия небольших тепловых нагрузок. В котельных с существенным преобладанием объема отпускаемой тепловой энергии потребителям, по сравнению с электрической энергией на собственные нужды, необходимо устанавливать ГТУ. ГТУ позволяют производить значительно больше тепловой энергии за счет утилизации тепла дымовых газов после ГТУ и при необходимости дополнительного сжигания природного газа в этом же котле-утилизаторе в потоке выхлопных газов турбины. Это важно для большинства существующих отопительных котельных, где отношение тепловой энергии, отпущен-

Секция 2

ной потребителям, к электрической энергии на собственные нужды изменяется в течение года в широких пределах.

Известно, что работа ГТУ в переменных режимах приводит к снижению КПД, к ускоренному износу рабочего ресурса и повышению стоимости ремонта. Для обеспечения высокого коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) ГТУ, наилучших технико-экономических показателей и уменьшения срока окупаемости необходимо ГТУ загружать в базовом режиме в течение всего года, вырабатывая электроэнергию на номинальной мощности с полной утилизацией тепла дымовых газов после ГТУ. Поскольку в котельных практически постоянной круглогодичной тепловой нагрузкой является горячее водоснабжение (ГВС), то на первом этапе необходимо выбрать ГТУ, обеспечивающей электроэнергией собственные нужды и тепловой энергией на ГВС за счет утилизации тепла дымовых газов и дополнительного сжигания природного газа в атмосфере выхлопных газов после ГТУ при необходимости.

В рассматриваемой котельной установлены два водогрейных котла ПТВМ-30М по 30 Гкал/ч и два водогрейных котла КГВМ-100 по 100 Гкал/ч. Используется температурный график 150 на 70°С со срезкой на 115°С. Котельная работает круглогодично: в отопительный период используются водогрейные котлы (два КГВМ-100 и два ПТВМ-30М в зависимости от температуры наружного воздуха), а в межотопительный период в работе находится один котел (ПТВМ-30М) с средней тепловой нагрузкой порядка 20 Гкал/ч. В качестве топлива в котельной используется природный газ Уренгойского месторождения с низшей теплотой сгорания $Q_n^c = 34694 \text{ кДж/м}^3$. Средняя потребляемая мощность электрической энергии на собственные нужды в течение года варьируется от 0,65 до 2,63 МВт.

Целью работы является разработка схемы модернизации котельной в мини-ТЭЦ за счет ее надстройки ГТУ со сбросом горячих продуктов сгорания в имеющийся штатный котел для обеспечения электроэнергией собственных нужд котельной и расчет технико-экономических показателей работы мини-ТЭЦ.

С учетом имеющихся в котельной двух водогрейных котлов ПТВМ-30М рассмотрим оптимальные варианты их использова-

Секция 2

ния для утилизации тепла выхлопных газов отечественных ГТУ с электрической мощностью порядка 2,5 МВт. Основные технические характеристики российских производителей ГТУ на основе конвертированных газотурбинных двигателей для удобства сравнения приведены в таблице из [2, 3].

Таблица

Основные характеристики ГТЭС

Основные характеристики ГТЭС	Урал-2500	ГТЭ-2,5	ГТЭС-2,5
Производитель	АО Авиадвигатель	ФГУП Завод им.В.Я. Климова	ОАО Сатурн-Газовые турбины
Номинальная электрическая мощность, МВт	2,5	2,2	2,5
Тепловая мощность на выхлопе при $t_{\text{вых}} = 110$ °С, Гкал/ч	5,82	4,2	3,87
КПД на клеммах генератора, %	20,6	22,8	26,5
Степень повышения давления компрессора	5,75	8,5	12
Температура газа перед турбиной, °С	681		950
Температура газа после турбины, °С	378	412	460
Расход газа на выхлопе, кг/с	24,4	16,24	14,7
Коэффициент избытка воздуха в выхлопных газах	5,78		4,26
Расход топливного газа на номинальном режиме ($H_u = 48744$ кДж/кг), кг/ч	873	782	697
Параметры газа перед ГТЭС: –давление, МПа –температура, °С	1-1,2 5-50	1,2-1,5 5-50	2,1-2,5 5-70
Стоимость ГТЭС, по данным [2, 3], тыс.\$	1250	1022	1270

Анализ основных технических характеристик ГТУ, приведенных в таблице, показывает, что наиболее оптимальным из условия согласования котла и ГТУ по расходу выхлопных газов

Секция 2

для обеспечения скорости последних в газоходе и разрежения в топке требованиям завода-изготовителя котла является ГТЭС-2,5 производства ОАО Сатурн -Газовые турбины. Расход выхлопных газов после ГТУ составляет 14,7 кг/с (таблица), что не превышает расхода дымовых газов котла ПТВМ -30М на номинальной нагрузке, равный 15,9 кг/с, определенный из технических характеристик котла [4]. Поэтому сброс выхлопных газов ГТУ в котел и дополнительное сжигание природного газа не приведет к превышению скорости газов в газоходе и разрежения в топке котла. ГТЭС-2,5 обладает также более высоким КПД на клеммах генератора и меньшим удельным расходом топлива на выработку электрической энергии по сравнению с другими отечественными ГТУ сопоставимой мощности. При этом минимальная тепловая нагрузка 4,5 МВт котлом ПТВМ-30М обеспечивается только за счет утилизации теплоты выхлопных газов после ГТУ, т. е. без дополнительного сжигания топлива в котле. Следует также отметить, что ОАО Сатурн -Газовые турбины является головной в структуре ОДК по разработке, производству, строительству, монтажу, пусконаладке и сервисному обслуживанию энергетических станций малой и средней мощности с использованием ГТД собственного производства и других предприятий ОДК [5].

Проведем оценочные расчеты для обоснования выбора котла ПТВМ-30М в качестве котла-утилизатора для утилизации тепла выхлопных газов после ГТУ и сжигания дополнительного природного газа.

При мощности ГТУ $N_3 = 2500$ кВт и КПД на клеммах генератора $\eta = 26,5\%$ расход топлива в камеру сгорания с учетом $Q_n^c = 34694$ кДж/м³ составляет $V_{ГТУ} = 0,275$ м³/с, а объем дымовых газов при сжигании данного количества газа с учетом $\alpha = 4,26$ равняется $V_{д.г.} = 11,82$ м³.

Содержание кислорода в выхлопных газах после ГТУ составляет 16,07 % и, соответственно, для дополнительного сжигания 1 м³ природного газа в котле-утилизаторе в атмосфере выхлопных газов при $\alpha = 1,05$ необходимо иметь действительный объем $V_{д.г.}$ дымовых газов в количестве 13,37 м³. Следовательно, возможный максимальный расход природного газа, сжигаемый в атмосфере выхлопных газов в котле-утилизаторе составляет $V_{KV} = 0,88$ м³/с. При сжигании такого количества газа в кот-

Секция 2

ле с учетом $\eta = 92\%$ и $Q_n^c = 34694 \text{ кДж/м}^3$ его тепловая мощность равняется $N_T = B_{KV} \cdot Q_n^c \cdot \eta = 28 \text{ МВт}$. Суммарная тепловая мощность котла без использования дутьевых вентиляторов с учетом теплоты утилизируемых выхлопных газов ГТУ составляет $N = N_T + N_{ут} = 32,5 \text{ МВт}$. Полученное значение суммарной мощности меньше на 2,5 МВт паспортного значения котла ПТВМ-30М. При необходимости увеличения мощности котла до 35 МВт необходимо подключить дутьевые вентиляторы, но опыт эксплуатации котельных показывает, что коэффициент использования установленной мощности котельных в среднем составляет 50-60 %. Так, например, в рассматриваемой котельной котел ПТВМ-30М в межотопительный период используется для ГВС средней тепловой мощностью порядка 20 МВт.

Таким образом, результаты расчета показывают, что утилизация тепла выхлопных газов ГТУ, работающей в базовом режиме на номинальной электрической мощности, позволяет получить без дожигания 4,5 МВт тепловой мощности. Дальнейшее увеличение тепловой мощности котла-утилизатора с 15 до 32,5 МВт осуществляется за счет дополнительного сжигания природного газа в атмосфере выхлопных газов ГТУ без применения дутьевых вентиляторов. Имеется возможность работы котла ПТВМ-30М в штатном режиме без утилизации тепла дымовых газов во время обслуживания и ремонтах ГТУ. В этом случае включаются дутьевые вентиляторы и сжигание природного газа в топке котла осуществляется в атмосфере воздуха.

Схема когенерационной установки приведена на рисунке. Установка состоит из ГТУ, соединенной с электрогенератором 1. Выхлопной патрубок 3 ГТУ соединен с коробом газохода, выполненный в виде тройника 4, где расположен регулирующий шибер 5. Выходной нижний боковой отвод 6 тройника соединен с блоком горелок 7 котла 8, а выходной верхний боковой отвод 9 соединен с блоком сбросных люков 10, которые расположены в потолочной части топке котла 8. Регулирующий шибер 5 тройника соединен с датчиком кислорода 11 в продуктах сгорания. Дымовые газы охлаждаются на трубных конвективных поверхностях нагрева воды и через газоход с помощью дымососа 12 выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

Секция 2

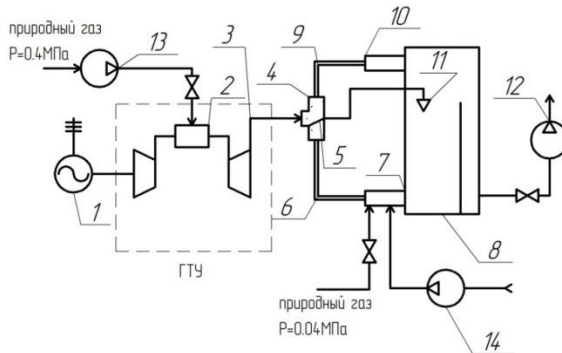


Схема когенерационной установки

Работа когенерационной установки происходит следующим образом. За счет подачи с помощью дожимного компрессора 13 и последующего сжигания топлива в камере сгорания 2 ГТУ приводится в действие газовая турбина и электрогенератор 1. В тройнике 4 выхлопные газы после ГТУ разделяются шибером 5 на два потока. Один из потоков по каналу 6 подводится к горелкам 7 котла 8. При этом положение шибера 5 обеспечивает оптимальный расход выхлопных газов в канале 6, который необходим для сгорания природного газа в горелках 7 котла с коэффициентом избытка воздуха в диапазоне $1,05 - 1,1$. Второй поток выхлопных дымовых газов ГТУ по верхнему отводу 9 тройника 4 подводится к блоку сбросных люков 10 и поступает в потолочную зону топочного пространства и смешивается с горячими продуктами сгорания природного газа, сжигаемого в горелках 7. Полученная смесь выхлопных газов ГТУ и продуктов сгорания природного газа, двигаясь сквозь конвективные трубные поверхности нагрева котла 8, нагревают сетевую воду, охлаждаются и выбрасываются с помощью дымососа 12 через дымовую трубу в атмосферу.

Управление оптимальным соотношением топливо-окислитель производится датчиком кислорода, который расположен перед блоком сбросных люков 10. Датчик связан с регулирующим шибером 5 тройника 4 газохода и положение шибера позволяет получить коэффициент избытка кислорода в продуктах сгорания природного газа в диапазоне $\alpha = 1,05 - 1,1$. Такая регулировка осу-

Секция 2

ществляется автоматически, что способствует дополнительному эффективному сжиганию природного газа в выхлопных газах для варьирования тепловой мощности котла от минимального значения 4,5 МВт до максимального значения 32,5 МВт.

Для обеспечения требуемого давления газа перед камерой сгорания ГТУ необходимо смонтировать дожимную компрессорную станцию для повышения давления природного газа с 0,4 до 2,1 МПа с узлом очистки и осушки газа. Необходимо провести модернизацию газовоздушного тракта котла ПТВМ-30М с возможностью перераспределения и управления потоками выхлопных газов ГТУ между верхней и нижней частью топочной камеры для увеличения тепловой нагрузки котла за счет дополнительного сжигания природного газа в атмосфере дымовых газов.

Для оценки технико-экономических показателей работы модернизированной котельной примем следующие исходные данные: стоимость природного газа – 6,18 руб/нм³, стоимость покупной (реализованной) электрической энергии – 5,3 руб/кВт·ч, стоимость тепловой энергии – 1300 руб/Гкал, общее время работы ГТЭС в течение года – 8000 часов, годовая выработка электрической энергии за вычетом электроэнергии на работу дожимного компрессора 18,4·10⁶ кВт·ч, годовая выработка тепловой энергии за счет утилизации тепла выхлопных газов ГТУ 30960 Гкал. Оценочные расчеты показывают, что удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии составляет 220 г.у.т./кВт·ч, а ее себестоимость – 1,3 руб/кВт·ч, прибыль от экономии на приобретение и продажу излишней электроэнергии составляет 73,6 млн. руб., прибыль от продажи утилизированной тепловой энергии равняется 40,24 млн. руб. При стоимости модернизации котельной в мини-ТЭЦ порядка 250 млн. руб. простой срок окупаемости составляет 2,3 года.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности модернизации котельной в мини-ТЭЦ для повышения эффективности ее работы. Для круглогодичного обеспечения электроэнергией собственных нужд в полном объеме, увеличения объема реализуемой электроэнергии сторонним потребителям по прямым договорам и повышения надежности работы котельной имеется возможность надстройки аналогичной ГТУ второго котла ПТВМ-30М. Перспективным направлением повышения

эффективности мини-ТЭЦ для тепло- и электроснабжения малых населенных пунктов является вовлечение местных видов твердого топлива за счет их предварительной газификации и пиролиза [6–9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон «О теплоснабжении» от 27.07.2010 №190-ФЗ. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 1.07.2023).

2. Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. часть 1. – ГТУ: Отчет; Некоммерческое партнерство «Российское теплоснабжение». – М. – 2004. – 127с. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru> (дата обращения: 19.07.2023).

3. Энергетическая линейка ОАО «Сатурн-Газовые турбины». Перспективы расширения на рынке // Специализированный информационно-аналитический журнал. Газотурбинные технологии. июнь, 2010. – С. 12–15. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://www.qtt.ru> (дата обращения 09.08.2023).

4. Котел водогрейный КВ-ГМ-35-150 (ПТВМ-30М). Руководство по эксплуатации. А-7513РЭ. Дорогобужкотломаш. – 2017. – 38 с. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://www.dkm.ru> (дата обращения 08.09.2023).

5. Юдин И.Д. Стратегия развития ОАО «Сатурн-Газовые турбины» // Специализированный информационно-аналитический журнал. Газотурбинные технологии. июнь, 2010. – С. 2–6. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://www.qtt.ru> (дата обращения 09.09.2023).

6. Султангузин И.А. Разработка технических решений для производства отечественных когенерационных установок с использованием технологий газификации и пиролиза местного твердого топлива / И.А. Султангузин, А.В. Федюхин, С.Ю. Курзанов, Т.А. Степанова, В.А. Тумановский // Промышленная энергетика – 2015. – №5. – С. 51–54.

7. 1 В.В. Электротермическая газификация твердых топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, В.Н. Орлов // Современные проблемы науки и образования – 2015. – №1–2. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19836> (дата обращения: 26.07.2023).

8. Афанасьев В.В. Исследование физико-химических свойств газификации местных видов топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.Н. Орлов, В.А. Тарасов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–2. С. 227–232.

9. Афанасьев В.В. Математическое моделирование энергетических балансов процессов газификации твердого топлива / В.В. Афанасьев, В.А. Тарасов, В.Г. Ковалев // Сборник: Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С. 46–58.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, см. стр. 213.

Ковалев Владимир Геннадьевич, см. стр. 213.

Краснов Евгений Вячеславович, см. стр. 213.

Серебрянников Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 2005 году окончил факультет радиотехники и электротехники, в 2010 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Анализ и расчет корректоров коэффициента мощности на базе современных микросхем управления». E-mail: alex-silver@mail.ru.

Туманов Юрий Альбертович, см. стр. 213.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПЕРЕВОДА РАЙОННОЙ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ 4-С Г.ЧЕБОКСАРЫ В РЕЖИМ КОГЕНЕРАЦИИ

Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В, Серебрянников А.В., Туманов Ю.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Исследуются варианты перевода районной отопительной котельной в режим когенерации. Показано, что наиболее оптимальным вариантом когенерационной установки является использование газотурбинной установки (ГТУ) и водогрейного котла ПТВМ-30М в качестве котла-утилизатора для нагрева сетевой воды высокотемпературными продуктами сгорания выхлопных газов от ГТУ.

Ключевые слова: отопительная котельная, водогрейный котел ПТВМ-30М, когенерация, паротурбинная установка, газопоршневая установка газотурбинная установка.

Согласно прогнозу развития отраслей ТЭК и стратегии развития энергетики России до 2035 года [1,2] в энергетике нашей страны не ожидается появление новых передовых технологий, которые бы вытеснили традиционную углеводородную энергетику. Вместе с тем развитие материаловедения и создание новых жаропрочных материалов и высокоэффективных технологий охлаждения лопаток газовых турбин уже сегодня позволили многим мировым машиностроительным компаниям разработать высокотемпературные (до 1500°C и выше) газовые турбины. Это позволило внедрить так называемые «теплоэнергетические установки предельной эффективности» - парогазовые установки (ПГУ) с КПД до 60–63 %. Внедрение современных ПГУ на тепловых электрических станциях позволяет существенно сократить удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии, повысить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) и коэффициент использования топлива (КИТ) по сравнению с ТЭЦ с паротурбинными установками. В условиях постоянного сокращения потребления тепловой энергии в целом по стране, многие ТЭЦ по требованию системного оператора вынуждены, часто работать, особенно в межотопительный период, в конденсационном режиме с перерасходом условного топлива. Из 277 ТЭЦ, эксплуатирующихся в стране, 209 работают на газе, которые суммарно потребляют около 103 млрд. м³ природного газа в год [3]. Поэтому не вызывает сомнений в необходимости модернизации ТЭЦ на основе ПГУ и ГТУ для увеличения выработки электрической энергии при существующем объеме теплотребления. Для технологического обновления газомазутных ТЭЦ наиболее востребованы ГТУ средней (110-130 МВт) и большой мощности (150-170 МВт) и ПГУ на их основе и с учетом санкций западных стран исключительно отечественного производства или лицензионные с высокой долей локализации. Однако отечественные предприятия пока такое оборудование серийно не производят. Поэтому в [3] предлагается начать модернизацию с малых и средних по мощности ТЭЦ для которых имеется практически полностью все необходимое отечественное оборудование не уступающее лучшим мировым аналогам, в том числе энергетические ГТУ на основе конвертированных авиадвигателей [4].

Одним из перспективных направлений развития отечественной энергетики в современных условиях является внедрение когенерационных установок малой мощности на основе ГТУ, газопоршневых установок (ГПУ) и паротурбинных установок (ПТУ) в районных и промышленных котельных для их модернизации в мини-ТЭЦ. Это позволит дополнительно увеличить в стране до 50 ГВт установленной электрической мощности с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии [1-2]. Внедрение когенерационных установок позволяет существенно экономить потребление топливно-энергетических ресурсов (до 25 % потребление газа) и уменьшить воздействие вредных продуктов сгорания на окружающую среду и поэтому является приоритетным направлением развития энергетики. Подтверждением этому является запрет в развитых странах ЕС и США использование на вновь вводимых или реконструируемых газовых ТЭЦ и котельных природного газа без когенерации [5]. Стоит отметить, что создание таких установок осуществляется в короткие сроки строительства, они повышают надежность теплоснабжения абонентов, снижают инерционность теплового регулирования по сравнению с крупными ТЭЦ и потери энергии в тепловых сетях.

Целью работы является исследование вариантов перевода районной отопительной котельной 4-С г. Чебоксары в режим когенерации.

В котельной 4-С установлены два паровых котла ДКВР-6,5/13 с паропроизводительностью 6,5 т/ч, два водогрейных котла ПТВМ-30М по 30 Гкал/ч, два водогрейных котла КГВМ-100 по 100 Гкал/ч. Максимальная присоединенная тепловая нагрузка составляет 295 Гкал/ч. Используется температурный график 150 на 70°С со срезкой на 115°С. Схема теплоснабжения двухтрубная открытая, часть потребителей подключены по четырёхтрубной закрытой схеме. Котельная работает круглогодично: в отопительный период используются водогрейные котлы (два КГВМ-100 и два ПТВМ-30М в зависимости от температуры наружного воздуха), а в межотопительный период в работе находится один котел (ПТВМ-30М). Основные показатели работы котельной 4-С за 2022 год приведены в табл. 1. В межотопительный период, с мая по сентябрь, тепловые нагрузки котель-

Секция 2

ных 5-С и 10М передаются в 4-С. Отношение тепловой энергии, отпущенной потребителям, к электрической энергии на собственные нужды изменяется в течение года от 28 до 46.

В качестве топлива в котельной используется природный газ Уренгойского месторождения с номинальным расходом до 30100 м³/ч и давлением до ГРП 0,4 МПа, а после ГРП 0,04/0,12 МПа. Состав газа по паспорту приведен в табл. 2.

Таблица 1

Основные показатели работы котельной

Месяцы	Средняя тепловая нагрузка, Гкал/ч	Средняя потребляемая мощность, МВт	Расход сетевой воды, т/ч	Потребление газа, тыс.м ³ /ч
январь	93,443	2,631	2396,948	14,254
февраль	79,699	2,379	2521,4879	11,496
март	82,621	2,268	2442,676	11,720
апрель	58,668	2,172	2289,253	8,275
май	29,510	1,214	1454,563	4,199
июнь	22,831	0,953	1266,520	2,902
июль	18,445	0,649	1187,240	2,401
август	18,037	0,866	1148,452	2,385
сентябрь	26,749	1,199	1450,790	3,596
октябрь	69,545	2,379	2960,335	9,263
ноябрь	80,501	2,358	2715,056	10,846
декабрь	95,109	2,582	2590,979	12,744

Таблица 2

Состав природного газа

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂
96,29	1,89	0,57	0,169	0,027	0,129	0,82	0,072

Для получения наилучших технико-экономических показателей и уменьшения срока окупаемости от модернизации котельной в мини-ТЭЦ необходимо когенерационную установку загружать на номинальную нагрузку в течение всего года, вырабатывая электроэнергию только на тепловом потреблении. В отопительных котельных практически постоянной круглогодичной тепловой нагрузкой является горячее водоснабжение. По-

Секция 2

этому выбор мощности когенератора для котельной 4-С на первом этапе необходимо проводить на отпуск тепловой энергии на ГВС порядка 23 Гкал/ч (табл. 1). Когенерационная установка должна работать параллельно с энергосистемой и полностью обеспечить потребности котельной в электроэнергии на собственные нужды, кроме времени, связанной с плановыми остановками когенерационной установки на ремонт и обслуживание, что существенно позволит сократить затраты на приобретение электроэнергии с энергосистемы. Излишки электроэнергии планируется продавать заключением прямых договоров, например, с АО НПК «Элара», который находится рядом с котельной 4-С.

Для модернизации котельной в мини-ТЭЦ в основном используются газопоршневые установки (ГПУ) и газотурбинные установки (ГТУ) [1-5], а иногда и паротурбинные установки (ПТУ) при наличии в котельной паровых котлов с редуцированием давления пара перед его использованием. Выбор оптимального состава когенерационной установки необходимо проводить для каждой котельной с учетом ее тепловой мощности, состава имеющегося установленного оборудования. При этом для модернизируемой котельной 4-С тепловая нагрузка является основной, которая должна выполняться круглогодично, а электрическая энергия сопутствующей. Следует также отметить, что в условиях многочисленных жестких экономических санкций против России и с учетом государственной политики импортозамещения для обеспечения энергетической безопасности страны необходимо в приоритетном порядке внедрять отечественное когенерационное оборудование.

С учетом имеющихся в котельной 4-С двух не задействованных паровых котлов ДКВР-6,5/13 с паропроизводительностью 6,5 т/ч, начальным давлением 1,3МПа и температурой пара на выходе 194 °С рассмотрим варианты установки ПТУ отечественных производителей, технические характеристики которых для удобства сравнения приведены в табл. 3 из [6].

Анализ технических характеристик ПТУ, приведенных в табл. 3, показывает, что наиболее оптимальным по расходу, давлению и температуре пара, а также массогабаритным размерам для утилизации избыточной энергии водяного пара двух котлов ДКВР-6,5/13 является ПТГ-500-25-13/3 производства фирмы

Секция 2

ООО «Электротехнический альянс» (Элта). Установка противодавленческой паровой турбины ПТГ-500-25-13/3 за счет расширения пара в турбине с 1,3 до 0,3 МПа позволяет вырабатывать 500 кВт электрической и до 2 Гкал/ч тепловой энергии, что не обеспечивает потребности котельной 4-С как в электрической энергии на собственные нужды так и в тепловой энергии на ГВС даже в межотопительный период (табл. 1).

Таблица 3

Технические характеристики ПТУ

Наименование	ПТГ-500-25-13/3 (Элта)	ТГ 05А/04 4Р 13/3,7 (Калужский турбинный завод)	ПТГ Р -0,6-15/3 (Пролетарский завод)	ПРОМ-500/1500-Э-14/3 (Электротех. копорация)
Мощность, кВт	500	500	600	500
Давление пара на входе, МПа	1,3	1,3	1,5	1,4
Температура пара на входе, °С	192	250	350	194
Давление пара на выходе, МПа	0,3	0,37	0,3	0,3
Температура пара на выходе, °С	132	160	230	132
Расход пара, т/ч	9	13,2	9	9,1
Масса, т	4,64	9,39	10	5,7
Длина, мм	1765	4235	5110	2810
Ширина, мм	1360	2130	2100	1100
Высота, мм	1465	2270	3110	1205

Для обеспечения тепловой нагрузки на ГВС необходимо оставить в работе водогрейный котел ПТВМ-30М. Поэтому вариант установки ПТУ, несмотря на низкий удельный расход топлива на производство электрической энергии, дешевизны оборудования и короткого срока окупаемости, не может быть рекомендован для перевода котельной 4-С в режим когенерации и может рассматриваться только как промежуточный вариант.

Для модернизации котельных в мини-ТЭЦ могут использоваться ГПУ, которые имеют высокий КПД (до 45 %) по выработке электрической энергии и сопоставимую по величине ути-

Секция 2

лизируемую тепловую энергию. При этом неоспоримым преимуществом ГПУ является возможность их эффективного использования при проектировании и строительстве новых когенерационных установок малой мощности 100...1000 кВт, что позволяет использовать их в качестве основного источника электрической и тепловой энергии в гостиницах, санаториях, пансионатах, тепличных хозяйствах, животноводческих комплексах и т.д. С увеличением единичной мощности ГПУ свыше 3,7 МВт технико-экономические показатели работы ГПУ уступают ГТУ.

ГПУ одинаковой мощности по сравнению ПТУ или ГТУ имеют большие размеры и массу, что создает трудности при модернизации котельной из-за отсутствия свободных мест. Так, например, отечественная газопоршневая электростанция Волгодизельмаш ГЭ10У с электрической мощностью 500 кВт имеет габаритные размеры $10000 \times 3000 \times 3420$ мм³ и массу 25000 кг, что примерно в 5 раз больше по сравнению с аналогичной по мощности ПТУ (табл. 2) [7]. Единичные мощности ГПУ на отечественных двигателях не превышают 1 МВт. Поэтому многие отечественные компании (ДВС Ресурс, Кама Энергетика, Новая энергетика, Автономный энергосервис и др) при разработке и создании ГПУ большой единичной мощности используют высокоэффективные иностранные двигатели, в том числе судовые. Кроме того многие иностранные ГПУ в настоящее время в силу санкций не поставляются в Россию или поставки осуществляются через третьи страны. Основные недостатки использования ГПУ для модернизации существующих котельных в мини-ТЭЦ – это большие массогабаритные размеры, что затрудняет ее размещение в котельной и недостаточное количество утилизируемой тепловой энергии. Так, например, ГПУ мощностью порядка 2,7 МВт, способна полностью обеспечить собственные нужды котельной 4-С электрической энергией (табл. 1), но не позволяет обеспечить в полном объеме тепловую нагрузку на ГВС порядка 23 Гкал/ч без подключения дополнительного водогрейного котла. ГТУ, в отличие от ГПУ, позволяют производить значительно больше тепловой энергии за счет утилизации тепла дымовых газов после ГТУ и дополнительного сжигания природного газа в

этом же котле-утилизаторе, что важно для большинства существующих отопительных котельных, в том числе котельной 4-С.

Поэтому в сложившихся условиях применение ГТУ для модернизации котельной 4-С в режим когенерации делает более предпочтительным по сравнению с ГПУ.

Надстройка котельной ГТУ может проводиться двумя способами- с использованием специального котла-утилизатора и со сбросом горячих продуктов сгорания в имеющийся штатный котел, например, водогрейный котел ПТВМ-30М. Использование котла-утилизатора по первому способу требует дополнительных затрат на его приобретение и свободной площади в котельной для его установки. С учетом того, что сжигание природного газа в ГТУ осуществляется с большими коэффициентами избытка воздуха ($\alpha = 3,5 \dots 7$), то использование котла ПТВМ-30М позволяет не только утилизировать теплоту горячих продуктов сгорания после ГТУ, но и там же сжигать дополнительное топливо для увеличения тепловой мощности котла вплоть до паспортных значений. При этом продукты сгорания после ГТУ используются в качестве окислителя, т.е. сжигание дополнительного природного газа в котле осуществляется без использования дутьевых вентиляторов. Для сохранения аэродинамического сопротивления газового тракта реконструируемого котла на приемлемом уровне необходимо ГТУ подбирать по расходу дымовых газов, а мощность должна быть достаточной для обеспечения собственных нужд котельной в электрической энергии.

Основными отечественными производителями ГТУ для малой энергетики являются: ОАО НПО «Сатурн», ОАО «Люлька-Сатурн», ОАО НПО «Искра», ОАО «Пермский моторный завод», АО «Авиадвигатель», ФГУП ММП «Салют», ФГУП «Завод им.В.Я.Климова», ФГУП НПП «Мотор», ЗАО «Энергоавиа»(ЦИАМ) [4]. Одним из успешных отечественных компаний, производящих газотурбинные электростанции для малой энергетики, является АО «Авиадвигатель» (Пермь). В настоящее время разработаны и созданы ряд газотурбинных энергоагрегатов мощностью 2,5...25МВт на базе конвертированных авиационных двигателей Д-30 и ПС-90А/А2, в том числе создан унификационный пекидж блочно-модульных газотурбинных электростанций серии «Урал-2500», «Урал-4000», «Урал-6000», со-

ответствующий международным стандартам API 616 [8]. ГТУ адаптированы для работы в параллель с энергосистемой, имеется возможность работы на попутном газе с высоким содержанием сероводорода, с котельным оборудованием различных производителей, имеется успешный опыт работы с энергетиками, газпромом, нефтяниками, и промышленными предприятиями, внедрено фирменное ремонтно-техническое обслуживание в течение всего периода работы ГТУ. Только для привода электрических генераторов по состоянию на 01.04.2018 г. изготовлено 350 различных ГТУ суммарной мощностью 2473 МВт и суммарной наработкой 11,7 миллиона часов.

С целью дальнейшего повышения эффективности использования когенерационных установок для тепло- и электроснабжения малых населенных пунктов перспективным направлением является вовлечение местных видов твердого топлива за счет их предварительной газификации и пиролиза [9-12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://government.ru/docs/all/128340/> (дата обращения 30.06.2023).

2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 30.06.2023).

3. Филиппов С.П. Технологическое обновление ТЭЦ России на базе газотурбинных технологий/ С.П. Филиппов, М.Д. Дильман // Фундаментальные проблемы исследований, разработок и реализации научных достижений в области газовых турбин в Российской экономике: сб. докладов LXV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. – Санкт-Петербург. – 2018. – С. 37–44.

4. Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. Часть 1. – ГТУ: Отчет; Некоммерческое партнерство «Российское теплоснабжение». – М. – 2004. – 127 с. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru> (дата обращения: 19.07.2023).

5. Иноземцев А.А. Использование газотурбинных технологий / А.А. Иноземцев, А.А. Васильев, И.Н. Шубин, А.Н. Сементин, Д.Д. Сулимов, А.Е. Костюченко // Энергосбережение. – 2001. – №2. – С. 15–18.
6. Паровые турбины малой мощности. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <http://www.elta.ru>. (дата обращения: 19.07.2023).
7. АО Волгодизельмаш имени Маминых. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://www.checko.ru>. (дата обращения: 25.07.2023).
8. Сулимов Д.Д. АО «ОДК Авиадвигатель» – 25 лет в энергетике России. / Д.Д. Сулимов // Фундаментальные проблемы исследований, разработок и реализации научных достижений в области газовых турбин в российской экономике: сборник докладов LXV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок – Санкт-Петербург, Изд-во ВТИ, 2018. – С. 9–14.
9. Султангузин И.А. Разработка технических решений для производства отечественных когенерационных установок с использованием технологий газификации и пиролиза местного твердого топлива / И.А. Султангузин, А.В. Федюхин, С.Ю. Курзанов, Т.А. Степанова, В.А. Тумановский // Промышленная энергетика – 2015. – №5. – С. 51–54.
10. Афанасьев В.В. Электротермическая газификация твердых топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, В.Н. Орлов // Современные проблемы науки и образования – 2015. – №1–2. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19836> (дата обращения: 26.07.2023).
11. Афанасьев В.В. Исследование физико-химических свойств газификации местных видов топлив / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.Н. Орлов, В.А. Тарасов // Фундаментальные исследования. – 2016. – №9-2. С. 227–232.
12. Афанасьев В.В. Математическое моделирование энергетических балансов процессов газификации твердого топлива / В.В. Афанасьев, В.А. Тарасов, В.Г. Ковалев // Сборник: Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С.46–58.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, см. стр. 213.

Ковалев Владимир Геннадьевич, см. стр. 213.

Краснов Евгений Вячеславович, см. стр. 213.

Серебрянников Александр Владимирович, см. стр. 232.

Туманов Юрий Альбертович, см. стр. 213.

НЕЧЁТКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ

Лысенко Д.С., ООО «Системы Контроля», г. Самара, Россия

***Аннотация.** Рассмотрен опыт разработки имитационной модели котла-утилизатора с применением аппарата нечёткой логики. Объект моделирования представлен многомерной термодинамической системой, технологические параметры которой изменяются в широком диапазоне. В работе представлено описание этапов синтеза модели и результаты апробации полученной модели на данных, снятых в процессе эксплуатации реальной установки.*

***Ключевые слова:** имитационное моделирование, котёл-утилизатор, моделирование теплообменных аппаратов, теплоэнергетика, нечёткая логика.*

«Любой, даже очень простой, объект нельзя точно описать математическими соотношениями. Знание о физических процессах внутри объекта всегда ограничено. Математическая модель, учитывающая все доступные пониманию особенности объекта, будет непомерно сложной в реализации. В связи с чем создаваемая модель должна быть как можно более простой, но при этом сохраняющей основные свойства объекта» [1].

Процессы, протекающие в котле-утилизаторе, имеют сложную динамику, вследствие чего их точное математическое описание становится трудоемким, а в некоторых случаях и невозможным. Котлы-утилизаторы водогрейные предназначены для подогрева сетевой воды, которая используется для обеспечения технологических процессов, отопления и горячего водоснабжения промышленных или жилых комплексов [2].

Задача создания модели котла-утилизатора была решена при помощи аппарата нечёткой логики. На первом этапе создания модели были определены физические закономерности и выявлена взаимосвязь между технологическими параметрами. Одновременно в котле-утилизаторе протекает два процесса: перенос тепла дымовым газом, поступающим с ГТУ и нагрев воды внутри теплообменника.

В качестве моделируемой величины выступает температура сетевой воды на выходе из котла-утилизатора. Температура се-

Секция 2

тевой воды на выходе из котла-утилизатора ($T_{\text{вых.}}$) зависит от: температуры питающей воды ($T_{\text{вх.}}$), расхода сетевой воды через поверхности теплообмена ($F_{\text{в}}$), расхода газа ($P_{\text{г}}$) и температуры газа ($T_{\text{г}}$), подаваемого в котёл с газотурбинной установки (ГТУ). На рис.1 приводится информация о многомерности объекта моделирования.

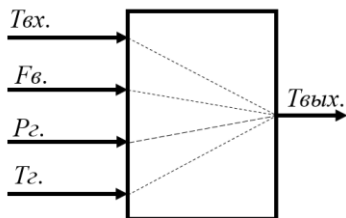


Рис. 1. Многомерность объекта моделирования

На втором этапе была осуществлена фаззификация входных переменных модели. Входные лингвистические переменные нечёткой модели T_i , F_w , P_g , T_g соответствовали физическим величинам температуры питающей воды ($T_{\text{вх.}}$), расход сетевой воды через поверхности теплообмена ($F_{\text{в}}$), расход газа ($P_{\text{г}}$), температура газа ($T_{\text{г}}$). Входные лингвистические переменные имели по три терма со значениями: «низкое» (Lw), «среднее» (Md), «высокое» (Hg). Для терма «низкое» была выбрана S подобная функция принадлежности. Для терма «среднее» была выбрана треугольная функция принадлежности. Для терма «высокое» была выбрана Z подобная функция принадлежности. Так же были определены области определения лингвистических переменных. В качестве алгоритма нечеткого вывода был использован алгоритм Сугено [3]. Выходная лингвистическая переменная (T_o) соответствовала физической величине температура сетевой воды на выходе из котла-утилизатора ($T_{\text{вых.}}$). Для дефаззификации выходной лингвистической переменной использовались следующие значения констант: $T_1=75$ °C; $T_2=77$ °C; $T_3=79$ °C; $T_4=81$ °C; $T_5=83$ °C; $T_6=85$ °C; $T_7=87$ °C; $T_8=89$ °C; $T_9=91$ °C; $T_{10}=93$ °C; $T_{11}=95$ °C.

На третьем этапе была создана база правил. В таблице представлена база правил нечеткой модели котла-утилизатора.

База правил нечёткой модели котла-утилизатора

T_i	P_g	F_w								
		Lw			Md			Hg		
		T_g								
		Lw	Md	Hg	Lw	Md	Hg	Lw	Md	Hg
Lw	Lw	T7	T7	T8	T4	T4	T5	T1	T1	T1
	Md	T7	T8	T8	T4	T5	T6	T1	T1	T2
	Hg	T8	T8	T9	T5	T5	T6	T1	T2	T2
Md	Lw	T7	T8	T8	T4	T5	T5	T1	T1	T2
	Md	T8	T8	T8	T4	T5	T6	T1	T2	T2
	Hg	T8	T9	T9	T5	T6	T6	T2	T2	T2
Hg	Lw	T8	T8	T9	T5	T5	T6	T2	T2	T2
	Md	T8	T9	T10	T5	T6	T7	T2	T2	T3
	Hg	T9	T10	T11	T6	T6	T7	T3	T3	T4
T_o										

В таблице используется компактное представление базы правил: каждая строка соответствует одному из возможных сочетаний термов лингвистических переменных T_i и P_g , каждый столбец соответствует одному из возможных сочетаний термов лингвистических переменных F_w и T_g . На пересечении столбца и строки определяется значение выходной лингвистической переменной (T_o), соответствующее сочетанию термов всех четырёх переменных.

Последним этапом создания нечеткой модели, стал этап апробации. На этом этапе проверялась точность модели. Для проверки точности модели были использованы архивные тренды снятые в процессе эксплуатации котла-утилизатора. Выходная переменная модели «Температура сетевой воды на выходе из котла-утилизатора» сравнивался с данными по температуре воды снятыми с реального котла-утилизатора. Для оценки точности модели использовалась средняя и максимальная абсолютная ошибка.

На рис. 2 приведен график, на котором отображены величины, температура сетевой воды на выходе нечеткой модели и температура сетевой воды, данные о которой были получены с реального котла-утилизатора. При этом среднее абсолютное зна-

Секция 2

чение ошибки модели составило $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальное абсолютное значение ошибки модели было равно $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Единицы измерения времени (такт) задаются относительно времени квантования сигнала в тестовой выборке.

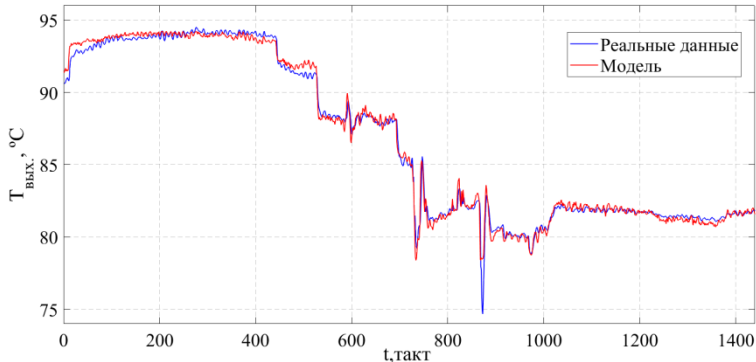


Рис. 2. Результат апробации нечёткой модели котла-утилизатора

Выводы

Созданная модель котла-утилизатора с достаточно высокой точностью описывает процессы теплообмена внутри установки. Согласно классификации задач, которые должны решать модели теплоэнергетических установок [1], разработанная модель применима для исследования статических характеристик установки и выбора оптимальных значений технологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций/ Под общ. редакцией Г. А. Филиппова, Ф. Ф. Пашенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 448 с. – ISBN 978-5-9221-1518-6.
2. Воинов А.П. Куперман Л.Н., Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 798 с.

Автор

Лысенко Дмитрий Сергеевич, инженер АСУ ТП, ООО «Системы Контроля». Институт автоматики и информационных технологий, Самарский государственный технический университет.

ДОЗИРОВАНИЕ РЕАГЕНТА «АМИНАТ КО-2»

Беляева Е.А., Бузаева А.А., Пазушкина О.В., ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ), г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** Кислород и углекислота легко вступают в химическую реакцию с поверхностью металла, постепенно разрушая ее, в результате коррозии. Поэтому одной из важных задач водоподготовки в теплоэнергетике является обескислороживание воды различными методами.*

***Ключевые слова:** Дегазация, деаэрактор, физическая дегазация, химическая дегазация, дозирование реагента, аминат КО-2.*

Водоподготовка – это обязательный технологический процесс, который осуществляется на специальных установках для удаления из воды содержащихся в ней примесей, солей и растворенного кислорода. Для котельных такой процесс является одним из важных этапов работы необходимым для нормальной работы теплового оборудования.

Паровые и водогрейные котлы имеют свои нормативы по качеству воды. Главной задачей водоподготовки в водогрейных котельных является удаление железа и солей жесткости, корректировка щелочности воды, а также снижение содержания растворенного кислорода, вызывающего коррозию. Требования к воде для паровых котлов жестче. Помимо механической очистки, удаления железа и солей жесткости, особое внимание уделяется общему содержанию растворенного кислорода. В теплоэнергетике контроль его содержания является важнейшей задачей для предотвращения повреждаемости металла кислородной коррозией. Также важна коррекция рН, достигающаяся путем ввода тех или иных реагентов для поддержания водно-химического режима котла.

На рис. 1 приведена схема водоподготовительного оборудования котельной.

Оптимальный состав оборудования водоподготовки обеспечивает требуемое качество воды; позволяет предотвратить коррозию трубопроводов и поверхностей нагрева; продлить срок службы энергетического оборудования; обеспечить без-

Секция 2

остановочную работу производства; снизить расход топлива; сократить количество шлама.

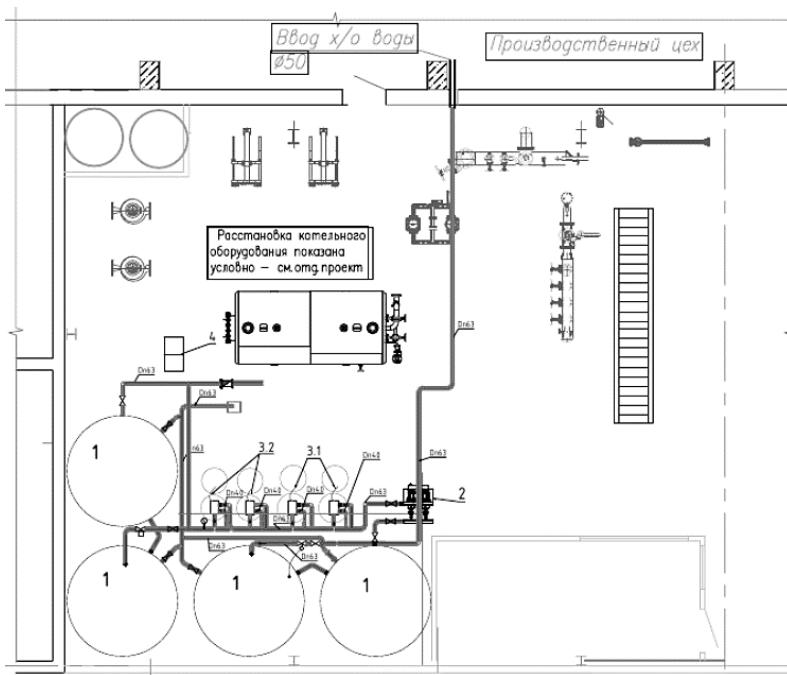


Рис. 1. План расстановки оборудования и трубопроводов котельной:
1 – емкость запаса воды; 2 – насосная установка; 3.1 – установка умягчения 1-й ступени; 3.2 – установка умягчения 2-й ступени; 4 – дозирующий комплекс ингибитора и коррекции

Дегазация – это процесс, направленный на удаление из питательной воды паровых и водогрейных котлов коррозионно-агрессивных газов – кислорода и свободной углекислоты.

Коррозионно-агрессивные газы попадают в исходную воду в результате длительного контакта с атмосферой или других физико-химических процессов. При обработке по схемам натрий-катионирования и водород-натрий-катионирования вода дополнительно насыщается двуокисью углерода за счет разложения бикарбоната натрия при нагревании.

Физическая дегазация – это безреагентный метод, который подразумевает создание определенных условий, при которых скопления газов удаляются самостоятельно, переходя в атмосферу. Дегазация воды таким методом выполняется на специальной установке, которая называется дегазатор жидкости (деаэратор), предназначенная для удаления растворенных газов.

Химическая дегазация – метод, не требующий изменения давления жидкости и её температуры. Он заключается в введении в воду специальных реагентов – химикатов, которые запускают процессы связывания газовых молекул в более крупные формирования, которые уже не способны провоцировать коррозию. Далее такие относительно большие пузырьки либо поднимаются вверх и удаляются из жидкости, переходя в атмосферу, либо задерживаются специальными фильтрами-уловителями [1].

Несмотря на то, что физическая деаэрация позволяет достичь глубокого удаления кислорода и углекислоты, все же требует применения дорогостоящего и громоздкого оборудования (деаэраторов), дополнительного расхода энергоресурсов: пара или сетевой воды на нагрев воды и электроэнергии для работы насосного оборудования.

Химическая дегазация кислорода и углекислоты не требует больших затрат на оборудование – дозирование реагентов осуществляется с помощью комплекса пропорционального дозирования, однако эта технология удаления кислорода требует тщательного рассмотрения в каждом конкретном случае, так как удалять газы она будет менее эффективно, чем физическая деаэрация. Для полного связывания кислорода требуется значительный расход реагента [2].

В качестве реагентов для обескислороживания применяется «Аминат КО-2». Данный реагент, на основе катализированного сульфита натрия, обеспечивает удаление растворенного кислорода в обрабатываемой воде.

Необходимая доза «Аминат КО-2» устанавливается в зависимости от концентрации растворенного кислорода (8 мг препарата на 1 мг O_2) и может колебаться в пределах от 5 до 100 мг/л. Дозирование контролируется поддержанием избытка сульфит-ионов в сетевой и циркулирующей воде на уровне

Секция 2

10-30 мг/л для котловой воды паровых котлов, 2-4 мг/л для водогрейного оборудования систем теплоснабжения [3].

«АМИНАТ КО-2» может вводиться в трубопровод добавочной или подпиточной воды, исключая взаимодействие обработанной воды с кислородом воздуха (в накопительных или питательных баках). Реагент рекомендуется дозировать в разбавленном виде с кратностью разбавления 4-10 раз.

Оптимальный эффект обескислороживания достигается в условиях температуры обрабатываемой воды выше 70°C. Предельная температура использования реагента 250°C [4].

Для теоретического расчета необходимой дозы разбавленного реагента был выбран город Ульяновск, отмечается приемлемое содержание растворенного кислорода в водах р. Волги, из которой осуществляется водозабор теплоисточников – 6,7–14,1 мг/л.

Необходимая доза реагента – 8 мг реагента на 1 мг O_2 .

Содержание растворенного кислорода O_2 необходимо умножить 8 мг реагента:

$$C_{O_2} = O_2 \cdot 8 \left[\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right] \quad (1)$$

Подставив разные значения содержаний разбавленного кислорода в формулу (1), получим следующие значения концентраций реагента: 64 г/м³; 80 г/м³; 96 г/м³; 112 г/м³.

Или с учетом плотности раствора (1,26 г/мл) в концентрированном виде рекомендуемая доза 50,8 мл/м³; 63,5 мл/м³; 76,2 мл/м³; 88,9 мл/м³.

Реагент рекомендуется дозировать в разбавленном виде с кратностью разбавления 4-10 раз.

Для разбавления в 5 раз к 10 литрам концентрированного исходного раствора необходимо добавить 40 л воды. Таким образом, доза разбавленного реагента составит от 254 мл/м³ до 444,5 мл/м³.

Для разбавления в 10 раз к 10 литрам концентрированного исходного раствора необходимо добавить 90 л воды. Таким образом, доза разбавленного реагента составит от 508 мл/м³ до 889 мл/м³.

Секция 2

Для сравнения полученных результатов был построен график зависимостей содержания растворенного кислорода O_2 от дозы разбавленного реагента, который представлен на рис. 2.

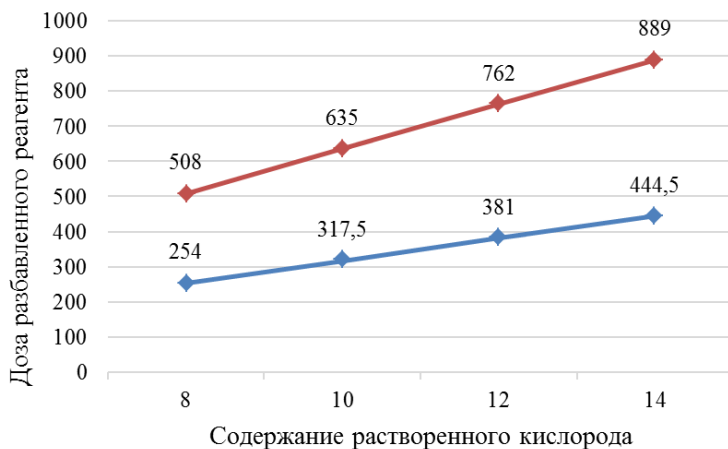


Рис. 2. График зависимости содержания растворенного кислорода O_2 от дозы разбавленного реагента

Таким образом, расчетами установлена необходимая доза реагента «Аминат КО-2».

Выводы

1. Рассмотрены физические и химические методы обескислороживания воды для котельных.
2. Выполнен расчет дозы реагента «Аминат КО-2» на основе катализированного сульфита натрия, которая обеспечивает удаление растворенного кислорода из обрабатываемой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лифшиц О. В.* Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп., М., «Энергия», 1976. 288 с.
2. ООО «Воды Урала» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vodaurla.ru/stati/udalenie-kisloroda-uglekisloty-deaeratsiya-degazatsiya.php>.
3. Аминат КО2, КО3, КО5, АминатК || Технические характеристики на реагенты [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ekowater.nt-rt.ru/images/manuals/aminat.pdf>.

4. Реагенты для коррекционных водно-химических режимов паровых котлов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://waterhim.ru/aminat/reagenty-dlya-korreksionnykh-vodno-khimicheskikh-rezhimov-parovykh-kotlov/aminattm-ko-2#primenenie>.

Авторы:

Беляева Елизавета Андреевна, бакалавр, студент 3-го курса, Строительный факультет, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ). E-mail: belyaeva_e.03@mail.ru.

Бузаева Анастасия Александровна, бакалавр, студент 3-го курса, Строительный факультет, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ). E-mail: nasya2003_29@mail.ru.

Пазушкина Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ). Строительный факультет, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ), 2003 г. Декабрь 2004 г. по специальности «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». E-mail: o.pazushkina@yandex.ru.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ СЕПАРАЦИИ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗА

Гильмутдинова З.А., науч. рук. доц. **Зинуров В.Э.**, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия

***Аннотация.** В статье рассмотрена проблема очистки газовых выбросов на промышленных предприятиях от твердых загрязняющих частиц. Рассмотрены аппараты для очистки газовых выбросов. Предложена конструкция нового устройства. Показан его принцип действия. Результаты исследований показали, что эффективность устройства возрастает при размере частиц до 310 мкм. Далее эффективность падает, т.к. частицы отскакивают от стенок и возвращаются в поток.*

Секция 2

Ключевые слова: *сепарация, улавливание частиц, сепарационное устройство.*

В РФ теплоэлектростанции выбрасывают 27 % общих поступлений загрязняющих веществ в атмосферу. Это является одним из наиболее высоких показателей. К примеру, выбросы от черной металлургии составляют 24 %, от цветной 10 %, от нефтедобычи и нефтехимии 15 %. В теплоэнергетике применение твердого топлива в качестве главного или резервного оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду в виде мелких несгоревших частиц, соединений твердых металлов и оксидов, которые негативно влияют на здоровье человека. Все эти загрязнения пагубно влияют как на условия жизни, так и на окружающую природную среду.

Для уменьшения наносимого вреда на окружающую среду и условия жизни работникам предприятий следует использовать современные, высокоэффективные аппараты или технологии очистки топлива дымовых газов от частиц при сжигании твердых видов топлива.

Одним из таких оборудований является золоуловитель-аппарат для очистки дымовых газов от летучей золы. На сегодняшний день любая действующая котельная, которая работает на твердом топливе, снабжается золоуловителем. Данные аппараты различают согласно принципу действия и делят на несколько видов: мокрые, сухие, электрические. При выборе золоуловителя необходимо принимать во внимание не только сжигаемое топливо, мощность котла, габариты, но и принцип действия, и эффективность. Одной из проблем золоуловителей считается невысокая эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц и изнашивание корпуса, прутков и иных конструктивных деталей. Нужно отметить, что высокоэффективные (до 99 %) электрические и мокрые золоуловители имеют ряд требований к улавливаемому материалу, трудны в эксплуатации и дороги.

В связи с этим перед предприятиями поставлены следующие задачи: повышение срока службы техники, увеличение степени очистки газовых поток от мелкодисперсных частиц.

Секция 2

Решением данной проблемы является использование сепарационного устройства с дугообразными элементами [1-4]. На рис. 1 продемонстрирована данная модель.

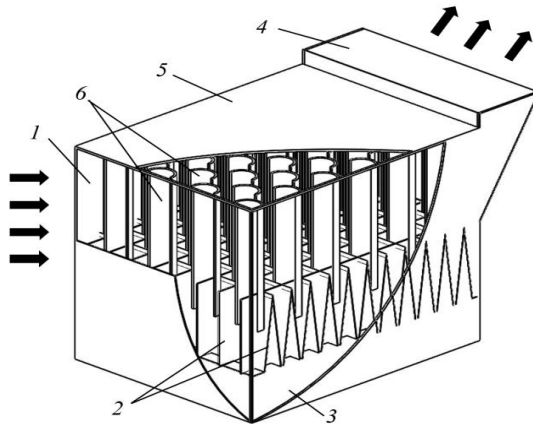


Рис. 1. Устройство для сепарации мелких частиц из газа: 1 – вход; 2 – сепарационная решетка; 3 – отсек для ссыпания частиц; 4 – патрубок для вывода очищенного газа; 5 – обечайка; 6 – дугообразные элементы

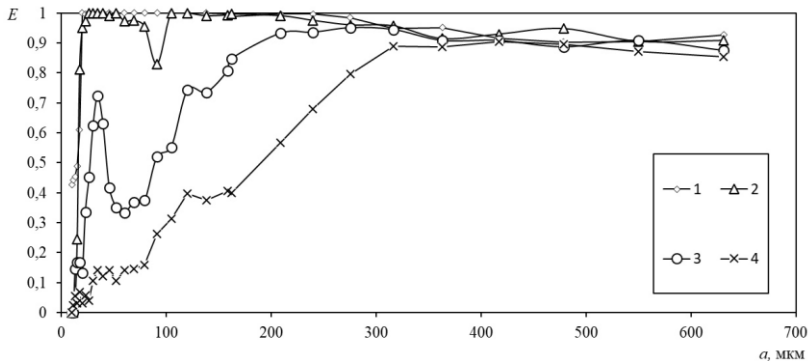


Рис. 2. Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц различного диаметра в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при плотности $\rho=7000 \text{ кг/м}^3$ при количестве рядов $N=9$ и скорости w , м/с: 1 – 0,5, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 3

Анализируя график, можно сделать следующие выводы: эффективность возрастает с ростом размера частиц, а именно: чем больше размер частиц, тем ее легче улавливать. Однако, Начиная с размера частиц – 310 мкм, эффективность устройства снижается на 10-20 %. Это обусловлено тем, что частицы отскакивают от элементов и возвращаются в поток. Максимальная эффективность сепарационного устройства составляет около 100 % для частиц размером более 230 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Салахова, Э.И.* Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41–46.

2. *Салахова, Э.И.* Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализатора / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Р. Набиуллин, И.И. Салахов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 57–64.

3. *Салахова, Э.И.* Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 5. – С. 60–64.

4. Численное моделирование очистки газа от твердых взвешенных частиц в сепарационном устройстве с вогнутыми отражающими элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, В.В. Харьков [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 8. – С. 10–14.

Автор

Гильмутдинова Зарина Альбертовна, студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Экономика и организация производства». E-mail: nes.annastasia@gmail.com.

Зинуров Вадим Эдуардович, см. стр. 223.

ВНЕДРЕНИЕ СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В КАЧЕСТВЕ ОЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Несмейко А.В., Зинуров В.Э., ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия

***Аннотация:** В статье предложена конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами для улавливания мелкодисперсных частиц. Сепарация частиц из газа происходит за счет центробежных и инерционных сил. Представлена трехмерная модель и описан принцип действия устройства. В ходе анализа результатов было установлено, что эффективность сепаратора увеличивается при уменьшении скорости.*

***Ключевые слова:** сепаратор, золоуловитель, мелкодисперсные частицы.*

Промышленные предприятия являются одними из основных источников загрязнения в окружающей среде. Поэтому первостепенными задачами по ее охране являются оптимизация и рационализация потребления ресурсов, и минимизация воздействия негативных факторов на климат и здоровья людей.

В теплоэнергетике использование твердого топлива в качестве основного или резервного оказывает негативное воздействие на окружающий мир в виде мелких несгоревших частиц, соединений твердых металлов и оксидов (NO_x – оксид азота, CO_x – оксид углерода и т.п.).

Поэтому для минимизации воздействия вредных факторов на условия жизни людей нужно использовать современное высокоэффективное оборудование для очистки дымовых газов от частиц при сжигании различных видов топлива.

Примером такого оборудования являются золоуловители – аппараты, которые улавливают летучую золу и несгоревшие частицы топлива из дымовых газов. Они устанавливаются между дымососами и газоотводными каналами котлов. Популярными типами золоуловителей: электрофильтры – в них частицы улавливаются под действием электростатического поля путем осаждения на электроды, мокрые – удаление частиц происходит из-за

Секция 2

того, что они оседают на смачиваемых поверхностях при промывании, сухие инерционные - отделение частиц от газа происходит под действием инерционных или центробежных сил, тканевые и комбинированные. При выборе золоуловителя важно учитывать не только мощность котла, габариты, сжигаемое топливо, но и эффективность и принцип действия. Одна из главных проблем золоуловителей, кроме электрофильтров и мокрых, это низкая эффективность очистки газовых потоков от тонкодисперсных частиц и износ корпуса и других конструктивных деталей. Стоит отметить, что высокоэффективные (до 99%) электрические и мокрые золоуловители имеют определенные требования к улавливаемому материалу, сложны в эксплуатации и дорожи.

Таким образом, для предприятий, использующих различные виды топлива, стоят задачи: увеличение срока службы оборудования и увеличение степени очистки газовых потоков от частиц мелкой фракции.

Для решения проблемы предлагается использовать разработанную модель сепаратора с дугообразными элементами [1, 2].

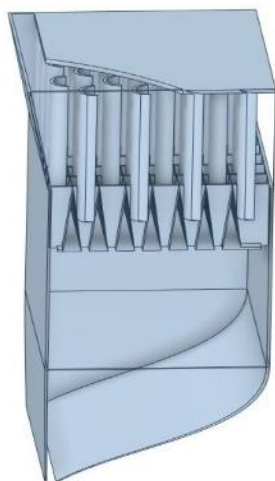


Рис. 1. Модель сепаратора с дугообразными элементами

Данная модель сепаратора показана на рис. 1. Строение устройства можно назвать простым, потому что представляет собой ряды дугообразных элементов, которые располагаются в шахматном порядке и заключаются в сепарационную решетку. Принцип действия: запыленный газовый поток набегаем навстречу дугообразных элементов, из-за их особого расположения относительно друг друга на него начинают действовать центробежные силы, в результате которых запыленные частицы выбиваются из структуры потока, отпрыгивают от внутренних стенок и дугообразных элементов, после этого попадают

Секция 2

вниз и осыпаются в бункер для сбора пыли, очищенный газовый поток направляется на выход из сепаратора [3].

С целью определения зависимости уровня эффективности данного аппарата от частиц различного диаметра был проведен расчет в программном комплексе ANSYS Fluent.

Во время расчетов была рассмотрена конструкция с диаметром средней линии 20 мм, а также скоростями газового потока 0,5 м/с, 1 м/с, 2 м/с и 3 м/с.

В результате расчета был получен график зависимости эффективности сепаратора с дугообразными элементами от диаметра частиц при различных скоростях газового потока (рис. 2).

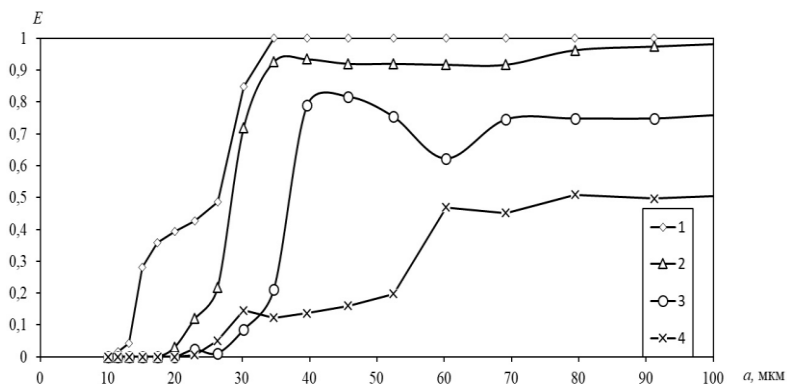


Рис. 2. Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц различного диаметра в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при плотности $\rho=3580 \text{ кг/м}^3$ при количестве рядов $N=5$ и скорости w , м/с: 1 – 0,5, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 3

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что лучше всего улавливаются частицы размером более 60 мкм, при уменьшении скорости увеличивается эффективность и средняя эффективность улавливания частиц при $w=0,5 \text{ м/с}$ составляет 80 %, при $w=1 \text{ м/с}$ – 65%, при $w=2 \text{ м/с}$ – 50 %, при $w=3 \text{ м/с}$ – 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салахова, Э.И. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализа-

Секция 2

тора / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Р. Набиуллин, И.И. Салахов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 57–64.

2. Салахова, Э.И. Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 5. – С. 60–64.

3. Салахова, Э.И. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41–46.

Авторы:

Несмейко Анастасия Вячеславовна, студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Экономика и организация производства». E-mail: nes.annastasia@gmail.com.

Зинуров Вадим Эдуардович, см. стр. 223.

III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ СРАБАТЫВАНИЯ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Зайцев Н.Ю., Зайцев Ю.М., Николаев Н.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Излагается методика расчета магнитодвижущей силы срабатывания (МДС) электромагнита с использованием программы конечно-элементного анализа FEMM (Finite Element Method Magnetics – магнитные расчеты методом конечных элементов). Реализация метода основана на использовании нелинейного уравнения, связывающего силу тяги электромагнита и МДС его обмотки управления. Создана плоско-параллельная модель приводного электромагнита вакуумного контактора KB2-250 на программе FEMM. Составлен алгоритм расчета МДС срабатывания электромагнита посредством решения предложенного нелинейного уравнения методом половинного деления. Предложенная методика апробирована на примере расчета МДС срабатывания приводного электромагнита вакуумного контактора KB2-250. Отличие расчетных данных от экспериментально определенных составило 2,7 %.*

***Ключевые слова:** электромагнит, цепевые методы, конечно-элементный анализ, плоско-параллельная модель, опорные точки, смешанное граничное условие.*

При расчетах и проектировании магнитных систем приводных электромагнитов цепевыми методами многократно приходится решать как прямые, так и обратные задачи расчета магнитной цепи (МЦ). В прямой задаче, как известно, по заданному магнитному потоку в рабочем зазоре рассчитывается требуемое значение магнитодвижущей силы (МДС) обмотки управления. При этом магнитный поток однозначно определяет электромагнитное усилие, действующее на якорь электромагнита. В обрат-

ной задаче расчета МЦ требуется найти магнитный поток в рабочем зазоре (следовательно, и электромагнитное усилие P_z) при заданном значении МДС обмотки управления F . Чаще решается именно обратная задача расчета МЦ. Расчеты магнитных систем цепевыми методами достаточно сложны, тем не менее они хорошо известны и широко применяются [1].

Ввиду большой сложности расчетов магнитных систем электромагнитов цепевыми методами в последние годы широко стали использоваться полевые методы расчета магнитных систем электромагнитных аппаратов [2,3]. Созданы множество как 2D, так и 3D компьютерных программ расчета магнитных полей электромагнитных механизмов. Наибольшее распространение получили программы, в которых для решения системы дифференциальных уравнений магнитного поля используется метод конечных элементов: Ansys-Maxwell, Comsol, Elcut (чисто отечественная программа), Femm и др.

Наиболее доступной и адаптированной для расчетов магнитных полей является специализированная программа FEMM. Программа FEMM (Finite Element Method Magnetics – магнитные расчеты методом конечных элементов) позволяет рассчитывать параметры плоскопараллельных и осесимметричных (плоскомеридианных), т.е. двумерных магнитных полей, методом конечных элементов [2]. Она решает как электромагнитную задачу, так и тепловую. Совместное их решение невозможно. Отличается простым и весьма дружелюбным интерфейсом. Имеет не очень большую базу материалов, но имеется возможность их пополнения новыми материалами (свойствами).

Моделирование любого электромагнитного устройства на программе FEMM начинается с обозначения и определения координат опорных точек моделируемого устройства. На рис. 1 показана построенная модель приводного электромагнита вакуумного контактора KB2-250 с обозначением опорных точек в соответствии с их координатами. Рабочий зазор соответствует критическому для срабатывания значению $\delta_{кр}=6$ мм. Путем соединения опорных точек отрезками прямых и дуг окружности строится геометрия модели на рабочем столе программы FEMM. Область решения задачи представляет собой окружность (опорные точки 34,35) радиусом $r_0=125$ мм. Окружающая

Секция 3

электромагнит среда – воздух (Air). На границе области решения задается смешанное граничное условие (Mixed) в соответствии с формулой [2]

$$c_0 = n/(\mu_0 r_0) = 1/(4\pi 10^{-7} r_0) = 6366198.$$

Двухкатушечный электромагнит включает П-образный магнитопровод и прямоходовый якорь, изготовленные из электротехнической стали марки 10895 (St10895). Обмотки управления включаются последовательно и согласно. В модели обмотка управления заменяется одножильным проводом прямоугольного сечения (медной токоведущей шиной), площадь поперечного сечения которого равна площади обмоточного окна обмотки (Obm1, Obm2). Параметрами свойства обмотки управления являются удельная электрическая проводимость σ материала токоведущей шины и плотность тока j в проводе.

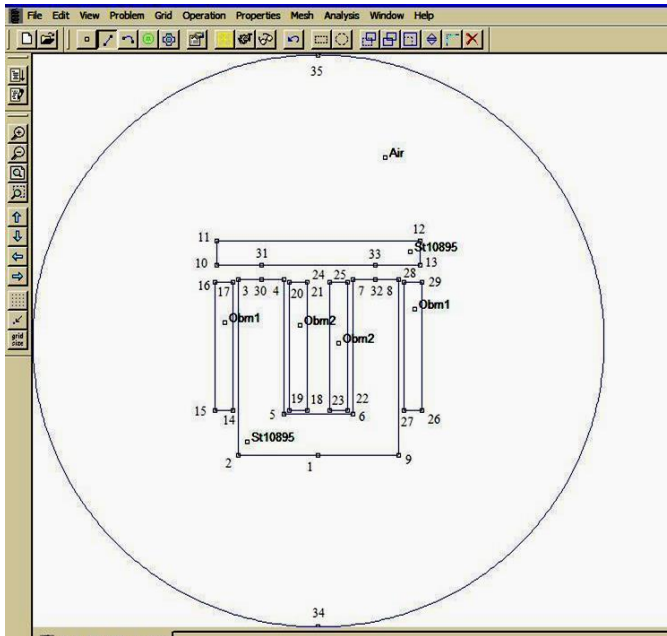


Рис. 1. Модель приводного электромагнита на рабочем столе программы FEMM (с обозначением опорных точек)

Необходимо отметить, что в плоско-параллельных моделях электромагнитов на программе FEMM при расчетах не учитывается часть электромагнитной силы, создаваемые потоками, вытекающими с поверхностей якоря, перпендикулярных плоскости сечения модели. Однако, если иметь ввиду, что эти потоки истекают с этих поверхностей перпендикулярно, то они в основном создают электромагнитную силу в горизонтальной плоскости и практически не участвуют в перемещении якоря к сердечнику.

При расчетах и проектировании приводных электромагнитов коммутационных электрических аппаратов исходными данными являются противодействующая (механическая) характеристика и рабочий зазор электромагнита. Требуется рассчитать МДС срабатывания обмотки управления электромагнита. Программа FEMM при известной геометрии и применяемых материалов для заданного значения МДС обмотки F позволяет рассчитывать распределение магнитного потока в магнитной системе и силу тяги электромагнита P_3 . Другие программные продукты также решают аналогичную задачу.

Многokrратно решая задачу расчета силы тяги электромагнита при различных значениях МДС обмотки управления с использованием программы FEMM (или других программных продуктов), можно построить нагрузочную характеристику электромагнита для критического зазора $P_3(F)$ (рис. 2). Затем эта зависимость может использоваться для решения как прямой, так и обратной задачи расчета магнитной цепи. Например, путем интерполяции (или аппроксимации) зависимости $P_3(F)$ или $F(P_3)$. При таком подходе к решению поставленной задачи может потребоваться достаточно большое количество опытов и много времени.

Для оптимизации времени решения задачи можно воспользоваться алгоритмами решения нелинейных уравнений. Известно, что электромагнитное усилие является нелинейной функцией МДС обмотки управления и представляет собой нагрузочную характеристику электромагнита

$$P_3 = f_1(F).$$

Поиск МДС срабатывания электромагнита можно свести к решению нелинейного уравнения (1):

$$f(F) = f_1(F) - P_{\text{мх.кр}} = 0, \quad (1)$$

где $P_{\text{мх.кр}}$ – противодействующее усилие для критического значения рабочего зазора электромагнита.

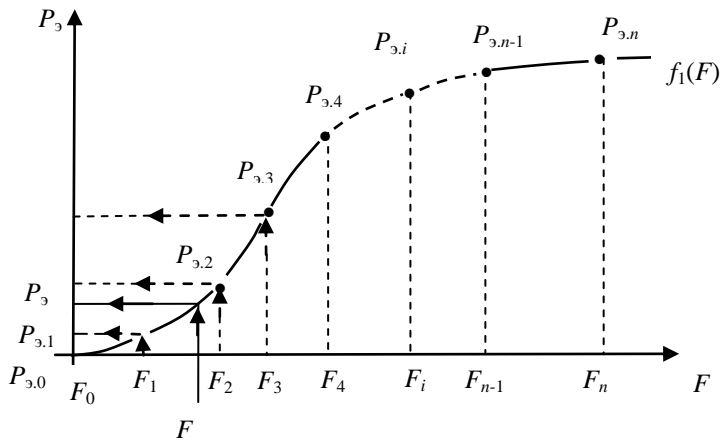


Рис. 2. Нагрузочная характеристика электромагнита

При этом нелинейная функция $f(F)$ представляет собой опущенную по оси y вниз на величину $P_{\text{мх.кр}}$ нагрузочную характеристику электромагнита (рис. 3). Срабатывание электромагнита произойдет при достижении электромагнитного усилия значения противодействующего усилия при критическом зазоре: $P_э = P_{\text{мх.кр}}$. Из кривых рис. 3 следует, что это условие выполнится, когда нелинейная функция $f(F)$ будет равна нулю. Таким образом, искомое значение МДС срабатывания электромагнита $F_{\text{ср}}$ равно корню нелинейного уравнения (1): $F_{\text{ср}} = F_*$. Действительно, при МДС, равной искомому, $P_э = P_{\text{мх.кр}}$ и нелинейная функция $f(F) = 0$ (рис.).

Анализ показывает, что функция $f(F)$ в большей своей части практически является монотонной. Следовательно, для решения нелинейного уравнения (1), т.е. определения МДС срабатывания электромагнита $F_{\text{ср}}$, можно воспользоваться любыми методами решения нелинейных уравнений: итерации, половинного деления, хорд, Ньютона, секущих-хорд и др. Как показали дополни-

Секция 3

тельные исследования, все эти методы достаточно хорошо сходятся. Для вычисления значения нелинейной функции $f(F) = f_1(F) - P_{\text{мх.кр}}$ для каждого значения МДС обмотки управления F выполняется расчет силы тяги электромагнита P_3 на программе FEMM. Для расчета силы тяги электромагнита P_3 можно использовать и другие программные продукты, например, Ansys.

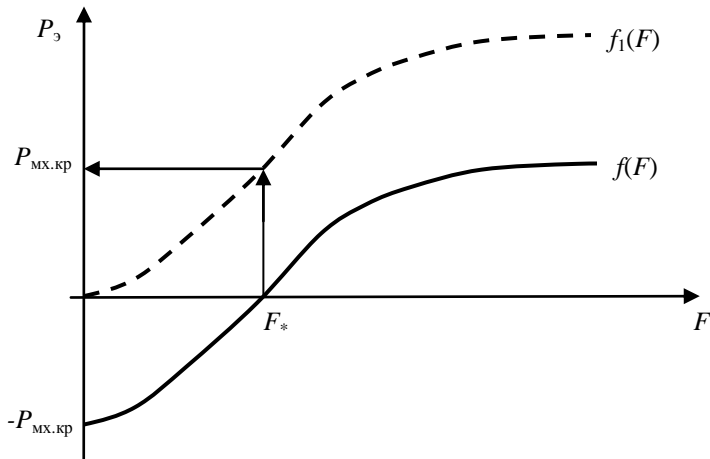


Рис. 3. Нелинейные функции $f_1(F)$ и $f(F)$

В данной работе предлагаемая методика апробирована на примере расчета МДС срабатывания приводного электромагнита вакуумного контактора КВ2-250 решением нелинейного уравнения (1) методом половинного деления. Отличие расчетных данных от экспериментально определенных не превышало 2,7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / Буль Б.К. и др. Под ред. Буткевича Г.В. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
2. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. Заведений / О.Б. Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.

3. *Байда, Е.И.* Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: учебно-методическое пособие / Е.И. Байда. – Харьков: НТУ «ХПИ»: 2015. – 157 с.

Авторы:

Зайцев Николай Юрьевич, индивидуальный предприниматель. В 2022 году окончил аспирантуру по специальности 05.09.01 «Электро-механика и электрические аппараты» при кафедре электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: ko1ya_zaisev@bk.ru.

Зайцев Юрий Михайлович, старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» В 1970 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова. E-mail: yur1y.zaytsev.46@mail.ru.

Николаев Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 1972 году. Защитил диссертацию по теме «Токовые реле защиты на герметизированных магнитоуправляемых контактах» в 1982 году. E-mail: nikniknik48@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ТОКОВЕДУЩИХ ШИН КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Зайцев Ю.М., Николаев Н.Н., Петров В.Н., Руссова Н.В.,
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В работе рассмотрено магнитное поле токоведущих шин круглого сечения. Аналитические формулы для расчета индукции магнитного поля одиночной токоведущей шины выведены с использованием закона полного тока. Основываясь на соотношениях, выведенных для единичной токоведущей шины, в работе получены расчетные соотношения для магнитного поля системы n параллельно расположенных круглых токоведущих шин. Формулы учитывают различные радиусы токоведущих шин; токи и их направления в шинах могут совпадать или не совпадать, исследуемая точка может нахо-

Секция 3

даться внутри какой-либо токоведущей шины или же нет. Они позволяют рассчитывать модули полной магнитной индукции и их проекций на оси координат, а также угол наклона вектора полной магнитной индукции к оси абсцисс. С целью сопоставления результатов расчета по аналитическим формулам и полевыми методами, для примера построена двумерная модель двух токоведущих шин на программе FEMM. Погрешности моделирования магнитной индукции не превышали 5 %.

Ключевые слова: индукция магнитного поля, закон полного тока, токоведущая шина, программа FEMM.

Обеспечение электромагнитной совместимости электромеханической и электронной аппаратуры, расположенной в комплектных устройствах, является актуальной задачей. В связи с этим необходимо знать уровни магнитных полей, создаваемых токоведущими шинами в окружающем пространстве. Магнитное поле бесконечно длинной токоведущей шины круглого сечения, центр которой совпадает с началом координат, находится с использованием закона полного тока [1]. Для упрощения вывода расчетных соотношений плотность тока по сечению шины принимается постоянной, а шина располагается в воздухе.

На основании закона полного тока модуль индукции магнитного поля в точке $A(x, y)$ с координатами x и y , расположенными внутри токоведущего контура радиуса R , ($r \leq R$, рис. 1, a), описывается формулой

$$B = \frac{\mu_0 j \pi r^2}{2\pi r} = \frac{1}{2} \mu_0 j r, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); j – плотность тока в шине; r – расстояние от центра шины до точки $A(x, y)$, $r \leq R$ [1]. Проекции вектора магнитной индукции на ось абсцисс и ось ординат соответственно равны:

$$B_x = B \sin \alpha \quad \text{и} \quad B_y = -B \cos \alpha. \quad (2)$$

Из геометрических построений рис. 1 следует, что

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \sin \alpha = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \cos \alpha = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (3)$$

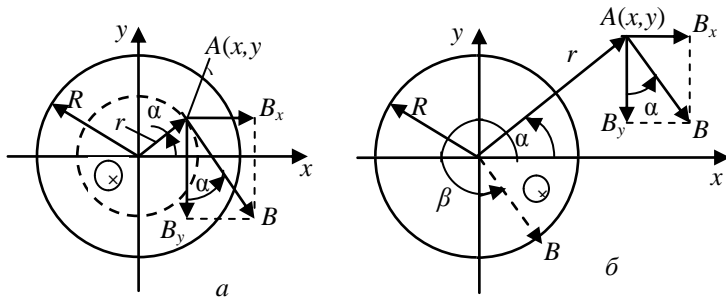


Рис. 1. К расчету магнитного поля круглой шины с током:
 а – для случая $r \leq R$; б – для случая $r \geq R$

С учетом (1), (2) и (3) модуль и составляющие магнитной индукции по осям Ox и Oy соответственно равны:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 j r = \frac{1}{2} \mu_0 j \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

$$B_x = \frac{1}{2} \mu_0 j r \frac{y}{r} = \frac{1}{2} \mu_0 j y, \quad B_y = -\frac{1}{2} \mu_0 j r \frac{x}{r} = -\frac{1}{2} \mu_0 j x. \quad (5)$$

Угол наклона вектора полной магнитной индукции B к оси абсцисс (рис. 1, б) определяется формулой (6):

$$\beta = \arctg \left(\frac{B_y}{B_x} \right) = \arctg \left(-\frac{x}{y} \right). \quad (6)$$

Когда точка $A(x, y)$ располагается за пределами токоведущей шины и $r \geq R$ (рис. 1, б), модуль индукции магнитного поля в этой точке на основании закона полного тока описывается формулой [1]

$$B = \frac{\mu_0 j \pi R^2}{2 \pi r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (7)$$

Проекции вектора магнитной индукции на оси координат определяются формулами (2) и (3):

$$\left. \begin{aligned} B_x &= B \frac{y}{r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{r} \frac{y}{r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{y}{x^2 + y^2}, \\ B_y &= -B \frac{x}{r} = -\frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{r} \frac{x}{r} = -\frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{x}{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Секция 3

Угол наклона вектора полной магнитной индукции B к оси абсцисс, как и в первом случае, определяется формулой (6):

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{B_y}{B_x} \right) = \operatorname{arctg} \left(-\frac{x}{y} \right).$$

На рис. 2 показан случай, когда центр токоведущей шины не совпадает с началом координат.

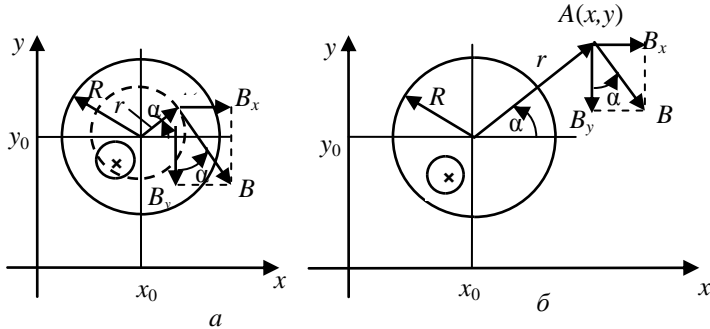


Рис. 2. К расчету магнитного поля круглой шины с током:
 a – для случая $r \leq R$; b – для случая $r \geq R$

Расстояние r от центра шины до точки $A(x, y)$ в данном случае определяется формулой

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (9)$$

Выражения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ с учетом (9) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{y - y_0}{r} = \frac{y - y_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}, \\ \cos \alpha &= \frac{x - x_0}{r} = \frac{x - x_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для случая расположения исследуемой точки $A(x, y)$ с координатами x и y внутри токоведущего контура ($r \leq R$, рис. 2, a), модуль индукции магнитного поля в точке $A(x, y)$ также описывается формулой (1) и с учетом (9)

$$B = \frac{\mu_0 j \pi r^2}{2\pi r} = \frac{1}{2} \mu_0 j r = \frac{1}{2} \mu_0 j \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}.$$

Проекция вектора магнитной индукции на оси координат определяются формулой (2). Подстановкой формул (9) и (10) в выражение (2) находятся проекции вектора магнитной индукции на оси координат:

$$B_x = B \sin \alpha = \frac{1}{2} \mu_0 j (y - y_0), \quad B_y = -B \cos \alpha = -\frac{1}{2} \mu_0 j (x - x_0). \quad (11)$$

Угол наклона вектора полной магнитной индукции к оси абсцисс

$$\beta = \arctg \left(\frac{B_y}{B_x} \right) = \arctg \left(-\frac{x - x_0}{y - y_0} \right). \quad (12)$$

Для случая расположения точки $A(x, y)$ за пределами токоведущей шины, когда $r \geq R$ (рис. 2, б), полная индукция магнитного поля в этой точке описывается формулой

$$B = \frac{\mu_0 j \pi R^2}{2\pi r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}. \quad (13)$$

Подставляя в выражения (2) формулы (10) для $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ находятся проекции вектора магнитной индукции на оси координат:

$$B_x = B \sin \alpha = \frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (14)$$

$$B_y = -B \cos \alpha = -\frac{1}{2} \mu_0 j R^2 \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (15)$$

Угол наклона вектора полной магнитной индукции к оси абсцисс определяется также формулой (12):

$$\beta = \arctg \left(\frac{B_y}{B_x} \right) = \arctg \left(-\frac{x - x_0}{y - y_0} \right).$$

Основываясь на соотношениях, которые были рассмотрены выше для одиночной токоведущей шины, в работе получены расчетные формулы для магнитного поля системы n круглых токоведущих шин. В общем случае размеры шин R_i могут различаться. Направления токов в шинах могут совпадать или не совпадать. Исследуемая точка $A(x, y)$ может находиться внутри какой-либо j -ой токоведущей шины, либо вне токоведущих шин. Пусть радиус i -ой токоведущей шины R_i , координаты центра

шины относительно начала координат x_i и y_i , плотность тока j_i . Причем плотность тока задается с учетом направления тока в шине. Если ток направлен от нас в плоскость сечения шины, то $j_i > 0$. Если ток направлен от плоскости сечения шины к нам, то $j_i < 0$. Расстояние от центра токоведущей шины до точки $A(x, y)$ обозначено через r_i .

Если рассматриваемая точка $A(x, y)$ располагается внутри j -ой токоведущей шины, то

$$B_x = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{1}{2} \mu_0 j_i R_i^2 \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right) + \frac{1}{2} \mu_0 j_j (y - y_j), \quad (16)$$

$$B_y = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \left(-\frac{1}{2} \mu_0 j_i R_i^2 \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right) + \left(-\frac{1}{2} \mu_0 j_j (x - x_j) \right). \quad (17)$$

Для случая расположения точки $A(x, y)$ вне всех токоведущих шин

$$B_x = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \mu_0 j_i R_i^2 \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right), \quad (18)$$

$$B_y = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{2} \mu_0 j_i R_i^2 \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right). \quad (19)$$

Модуль полной магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (20)$$

а угол наклона вектора полной магнитной индукции B к оси абсцисс определяется формулой

$$\beta = \arctg \left(\frac{B_y}{B_x} \right).$$

В качестве примера были выполнены расчеты по вышеприведенным аналитическим формулам (13) – (20) магнитной индукции двух параллельных токоведущих шин круглого сечения. Радиусы токоведущих шин были одинаковыми и равны $R_1 = R_2 = 2$ мм; расстояние между центрами токоведущих шин 8 мм; плотности токов в шинах $j_1 = j_2 = -1000$ А/мм². Расчеты выполнены для случаев расположения рассматриваемой точки как внутри, так и вне токоведущих шин (рис. 3). Так как центры

Секция 3

токоведущих шин располагались по оси Ox , то естественно, составляющие магнитной индукции по этой оси равны нулю. Поэтому были рассчитаны только составляющие по оси Oy .

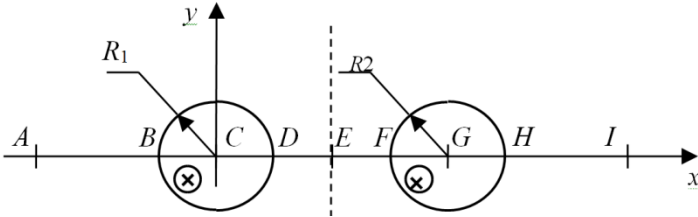


Рис. 3. К примеру расчета и моделирования магнитного поля двух круглых шин

Выполнено моделирование магнитного поля рассматриваемых шин в программе FEMM (магнитные расчеты методом конечных элементов) [2]. При моделировании на FEMM радиус области решения задачи принимался равным 10 мм, длина стороны конечного элемента внутри токоведущих шин задавалась равной 0,1 мм, а в области окружающего пространства – 0,2 мм. При этом число узловых точек сетки равнялось 10472, число конечных элементов – 20654. На внешней границе области решения задачи задавалось смещенное граничное условие: коэффициент $c_0 = n / (\mu_0 R) = 79577415$. На рис. 4 представлено изменение нормальной к линии $A-I$ составляющей вектора магнитной индукции B_y (вдоль оси Ox).

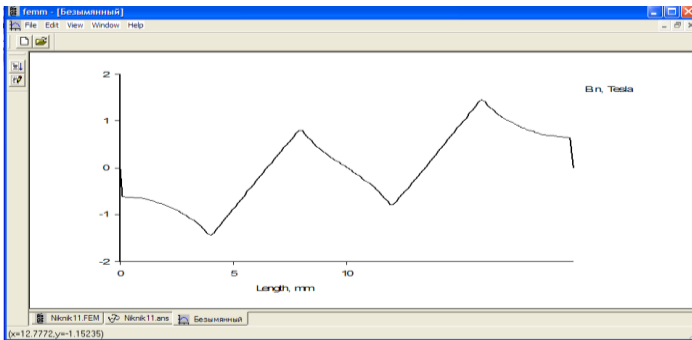


Рис. 4. Изменение нормальной составляющей вектора магнитной индукции вдоль линии $A-I$

Сопоставление результатов расчетов и моделирования магнитной индукции в указанных на рис. 3 точках показывают, что погрешности моделирования на FEMM не превышают 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бессонов, Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.

2. *Буль, О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. Заведений / О.Б. Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.

Авторы:

Зайцев Юрий Михайлович, см. стр. 265.

Николаев Николай Николаевич, см. стр. 265.

Петров Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». В 2014 году окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2021 году защитил диссертацию по теме «Усовершенствованные методики параметрического синтеза электромагнитных приводов постоянного напряжения аппаратов распределения и управления». E-mail: rvn.chuvsu@yandex.ru.

Руссова Наталья Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». В 1994 году окончила электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. Диссертацию на тему «Моделирование и синтез симметричных двухкатушечных П-образных электромагнитов постоянного и выпрямленного напряжения» защитила в 2005 году. E-mail: russova@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЛЕ СОВМЕСТНО С АСУТП

Четвериков С.В., ООО «Амадон», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье рассматривается вопрос применения интегральных реле совместно с системами управления технологическими процессами, отдельными модулями и устройствами защиты и управления с целью увеличения ремонтпригодности, надёжности и оперативного доступа при наладочных работах. Также излагается сама идея конструкции данных реле.*

***Ключевые слова:** промежуточные реле, АСУТП, ключевой режим транзистора, оптрон.*

Широко применяемые на сегодняшний день автоматизированные системы управления технологическими процессами, как микропроцессорные многофункциональные, так и модульные, для отдельных операций базируются, как правило, на одном общем принципе построения выходных управляющих цепей. Этот принцип характеризуется применением маломощного встроенного реле, имеющего гальваническую развязку от остальной схемы устройства, на каждый выходной канал изделия. Суммарно же, количество таких релейных выходов, может достигать числа свыше 20. Далее, свободные контакты указанного реле, с коммутационной способностью в основном от 5 до 10 Ампер, подключаются к цепи управления катушкой промежуточного реле, контактная группа которого уже рассчитана на гораздо больший коммутируемый ток. С его помощью осуществляется управление исполнительными устройствами (рис. 1).

На схеме управляющий сигнал от ПЛИС через токоограничивающий резистор $R1$ и оптрон $OP1$ подаётся на базу транзистора $VT1$. Транзистор работает в ключевом режиме, и, открываясь, подаёт питание на катушку реле $K1$. Контакты реле $K1.1$ подключены к клеммам выходного канала DO устройства. При этом питание цепи включения реле $K1$ осуществляется от отдельного источника питания напряжением $U_{цз}$ для гарантированной гальванической изоляции цепей ПЛИС от схемы цепи управления. Через клеммы DO подключается цепь запуска мощ-

Секция 3

ного промежуточного реле $Kп$, которое, в свою очередь управляет исполнительным устройством или несколькими устройствами.

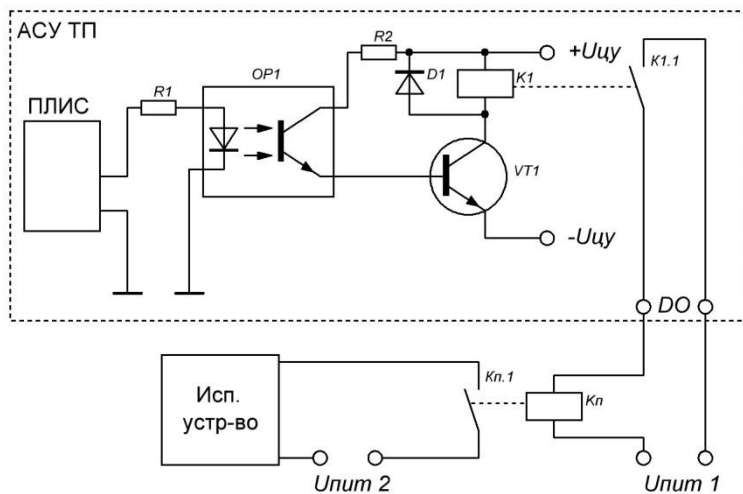


Рис. 1. Электрическая схема управления исполнительным устройством от вывода ПЛИС до субъекта управления, упрощённый вариант

Недостатками такой схемы работы, безусловно, являются пониженные надёжность и ремонтпригодность, уменьшенное быстродействие цепи управления, наличие дополнительной нагрузки на источник питания АСУТП. Наличие небольшого реле, как первой ступени управления между микропроцессором (или иным электронным компонентом, генерирующим сигнал) вносит в цепь управления дополнительную задержку (около 8 мс), из-за наличия дополнительной контактной системы в этой цепи снижается надёжность всего соединения. Кроме того, при выходе из строя одного из реле выходных каналов, приходится заменять устройство целиком или же его функциональный блок в сборе, что часто оказывается крайне дорогим мероприятием. Кроме того, данные управляющие реле потребляют в среднем от 10 до 60 мА каждое, что создаёт необходимость применения довольно мощного дополнительного источника питания, обяза-

тельно гальванически отделённого от цепей питания основной схемы управления (ПЛИС или микропроцессор).

Альтернативным способом, лишённым описанных выше недостатков, является применение интегральных промежуточных реле или контакторов. Построен такой аппарат следующим образом: внутри корпуса мощного промежуточного реле или контактора находится схема управления его катушкой с гальванически развязанным входом для непосредственного подключения управляющего напряжения. Для электромагнита реле применяется катушка постоянного тока – это позволяет применять более дешёвую конструкцию магнитопровода и избежать выхода из строя катушки при заклинивании подвижной системы реле. В качестве ключевого элемента используется мощный биполярный или МОП транзистор, работающий в ключевом режиме. Его база (или затвор) управляются от оптрона гальванической развязки, к которому подводится управляющее напряжение извне. Питание такого реле осуществляется постоянным или переменным напряжением (в таком случае в схему вводится выпрямитель), причём питающее напряжение подаётся на устройство постоянно. Управляющее напряжение фиксированное, 24 В постоянного тока, что соответствует промышленному стандарту и обеспечивает достаточную защиту от ложных срабатываний. Упрощённая схема интегрального реле с биполярным транзистором в качестве силового ключа на рис. 2.

Управляющее напряжение от логического устройства подаётся на клеммы *U_{упр}*. Проходя через фильтр *C1*, защитный варистор *VR1* и токоограничивающий резистор *R1*, оно подходит к светодиоду оптрона *ОП1*. Светодиод начинает излучать световой поток, попадающий на фототранзистор оптрона, который, в свою очередь, открывается. Через делитель напряжения *R2* и *R3* управляющее напряжение подаётся на базу силового транзистора *VT1*, который, открываясь, подаёт питание на катушку реле *K1*, зашунтированную диодом *D1* (для защиты от ЭДС обратной индукции). При этом питание *Unum* подаётся на устройство постоянно, а управляющее напряжение *U_{упр}* только при необходимости включить катушку *K1* и замкнуть, соответственно, контакты *K1.1*.

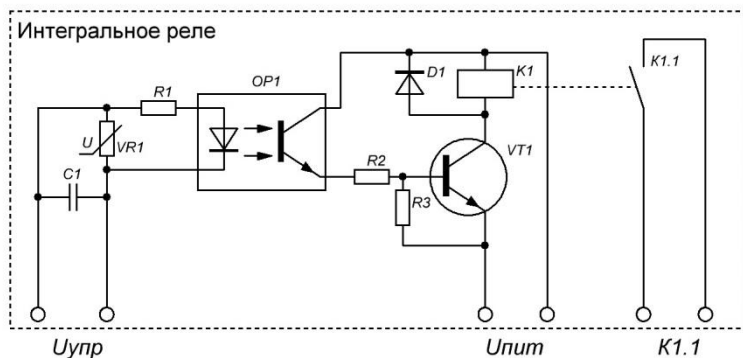


Рис. 2. Упрощённая электрическая схема интегрального реле

Схема, указанная на рис. 2 – упрощённая. В зависимости от напряжения и потребляемого тока катушки электромагнита реле подбираются характеристики и схемное исполнение выходного каскада. При необходимости питания от переменного тока вводится выпрямитель. Если нужна задержка при включении или отключении – добавляется реле времени. Возможно также внедрение простой логики (триггеры), световой индикации и т.п.

При групповом применении интегральных реле в шкафах управления, к ним подводится общая шина питания от оперативного источника тока и проводники управления от логического устройства АСУТП (терминала, ПЛК или отдельных модулей контроля и управления). В случае выхода из строя одного из реле, диагностика и устранение неисправности довольно просты и занимают мало времени. На рис. 3 изображена электрическая схема управления исполнительным устройством от АСУТП при применении интегрального реле.

В сравнении со схемой на рис. 1 очевидно серьёзное упрощение в блоке выходов АСУ ТП – отсутствует силовой ключ, управляющее реле и сопутствующие детали. Для управления интегральным реле достаточно единиц миллиампер, что вполне обеспечивается транзистором оптрона. $U_{упр}$ – напряжение питания цепей управления, аналогично предыдущему варианту схемы требует отдельного источника питания для обеспечения развязки с цепями питания ПЛИС или микропроцессора. $U_{num} 1$ –

Секция 3

постоянное напряжение питания интегрального реле. $U_{num} 2$ – напряжение питания исполнительного устройства.

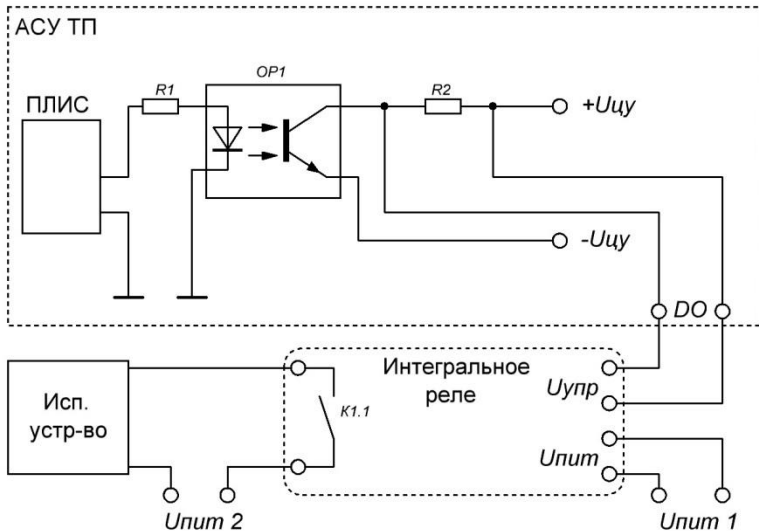


Рис. 3. Электрическая схема управления исполнительным устройством от вывода ПЛИС до субъекта управления с интегральным реле, упрощённый вариант

Сравним время, которое затрачивается от момента формирования выходного сигнала на выводе ПЛИС до замыкания контактов промежуточного реле $K1.1$ по схеме на рис. 1 и аналогичное время для схемы на рис.3 (до замыкания, соответственно, контактов $K1.1$ интегрального реле). Для наглядности, электромагнитное реле в составе интегрального для схемы рис. 2 и промежуточное реле для схемы рис.1 используем одинаковое, широко распространённой компании Finder, модели 55.32.9.024.0000 [3]. Оптроны модели LTV817 [4], силовые транзисторы КТ815Б [5] будем использовать также аналогичные для всех схем. В качестве управляющего реле выходного канала АСУТП схемы на рис. 1 (реле $K1$) используем реле для монтажа на печатную плату Finder 40.31.7.024.0000 [6].

Время от появления управляющего сигнала ПЛИС до фактического замыкания контактов $Kn.1$ примем за T_{Σ} :

$$T_{\Sigma} = T_{OP} + T_{VT} + T_{k1} + T_{Kn}, \quad (1.1)$$

где T_{OP} – время срабатывания оптрона, равное 0,018 мс [4]; T_{VT} – время включения силового транзистора равное 0,0003 мс [5]; T_{k1} – время срабатывания управляющего реле K1, составляющее, 7 мс [6]; T_{Kn} – время срабатывания промежуточного реле Kn равное 10 мс [3]. Суммируя имеющиеся значения каждого элемента схемы, получаем итоговое время равное 17,0021 мс.

Для схемы на рис. 3, с интегральным реле, собранным по схеме на рис. 2 время от появления управляющего сигнала ПЛИС до фактического замыкания контактов $K1.1$ примем за величину t_{Σ} :

$$t_{\Sigma} = 2 \cdot T_{OP} + T_{VT} + T_{k1}, \quad (1.2)$$

где величины T_{OP} , T_{VT} , аналогичны значениям в формуле 1.1; T_{k1} – время срабатывания промежуточного реле $K1$, используемого в составе интегрального реле, равное 10 мс [3]. Суммарное время получается 10,0363 мс, что на 7 мс или в 1,69 раз меньше, чем в предыдущем варианте. Величинами T_{OP} и T_{VT} , в целом, можно пренебречь ввиду их малого значения в сравнении с T_{k1} и T_{Kn} .

Общая наработка на отказ, ввиду отсутствия дополнительного электромеханического элемента, каким являлось реле $K1$ в схеме на рис. 1, теперь зависит в большей части от характеристик только интегрального реле. Ток, потребляемый выходным каналом АСУТП на схеме из рис. 3, соответственно снижается до значения 6 мА [4].

Выводы

Применение интегральных реле в различных модификациях и схемах включения позволит существенно сократить время включения исполняющих устройств, что может оказаться суще-

ственным для цепей аппаратов защиты. Кроме того, возможность оперативно выявлять и производить замену вышедших из строя устройств, широкие возможности для вариативности встроенных схем управления делают интегральные реле весьма перспективными для дальнейшего использования при создании систем управления технологическими процессами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Никифоров И.К.* Основы электроники и электронные компоненты: учеб. пособие / И.К. Никифоров. – Чебоксары. – Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 294 с.

2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электропитания: Учебник для вузов / В.А. Андреев. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.

3. 55 Series – Miniature general purpose relays 7 – 10 A: [Электронный ресурс] // Чип и Дип. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/004/DOC001004089.pdf>. (Дата обращения: 13.10.2023).

4. High Density Mounting Type Photocoupler LTV-817 Series: [Электронный ресурс] // Чип и Дип. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/222/DOC000222300.pdf>. (Дата обращения: 13.10.2023).

5. КТ815 p-p кремниевый биполярный транзистор: [Электронный ресурс] // Чип и Дип. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/005/DOC003005090.pdf>. (Дата обращения: 13.10.2023).

6. Miniature PCB Relays 8 - 10 - 12 - 16 A: [Электронный ресурс] // Чип и Дип. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/157/DOC026157765.pdf>. (Дата обращения: 13.10.2023).

7. Никитин А.А., Шамис М.А. Элементы электронных электрических аппаратов: Учеб. пособие / А.А. Никитин, М.А. Шамис. Чебоксары.: Изд-во Чуваш. ун-та, 2004. – 484 с.

Автор

Четвериков Станислав Валерьевич, бакалавр техники и технологий, ИТА ЮФУ; магистрант кафедры ЭиЭА, ЧувГУ; руководитель группы НТР, ООО «Амадон». Окончил Инженерно-технологическую академию Южного Федерального университета, факультет электронного приборостроения, в 2010 году. В настоящий момент является магистрантом Чувашского Государственного университета, факультет энергетики и электротехники, кафедра электрических и электронных аппаратов. Работает руководителем группы научно-технического развития в ООО «Амадон». E-mail: sc.engineering@vk.com.

ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРЕДПРИЯТИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ

Сущенко В.С., Швецов Р.С., Ярков Д.А., ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола, Россия

***Аннотация.** В работе рассматривается применение накопителей энергии для снижения потребляемой электрической энергии с помощью установки накопителей энергии, рассчитанных на основании известных данных потребления.*

***Ключевые слова:** накопитель энергии, управления, пиковая нагрузка, контрольные часы, потребление электроэнергии, выгода, окупаемость.*

Введение

Накопители электроэнергии являются одними из самых важных элементов в современных энергетических системах. Они позволяют сохранять и использовать энергию, полученную из различных источников, в том числе солнечных панелей, ветрогенераторов или сетевой электроэнергии, в нужное время.

Одной из наиболее распространенных форм накопления электроэнергии являются аккумуляторы. Они должны иметь возможность работы в режиме частых и кратковременных зарядов и разрядов [2].

Идея применения

В текущей работе накопители энергии использованы для экономии стоимости при потреблении электрической энергии, которые расположены у потребителя. Накопители энергии (далее НЭ) подключаются к электрической сети через контроллер, который управляет моментами выключения и отключения НЭ по заданному алгоритму. Система переключается на работу от системы аккумуляторов только в конкретные часы, а именно исходя из усредненных графиков пиковых часов [7]. При выборе НЭ он должен иметь возможность работы

Наглядность применения системы НЭ показана на профиле мощности до и после применения НЭ на рис. 1.

Ценообразование для потребителей электроэнергии

Для оплаты потребленной электрической энергии и мощности юридическими лицами используется различные ценовых категорий. Например, на сайте ПАО «ТНС энерго Марий Эл» опубликованы уровни цен на август 2023 года [3].

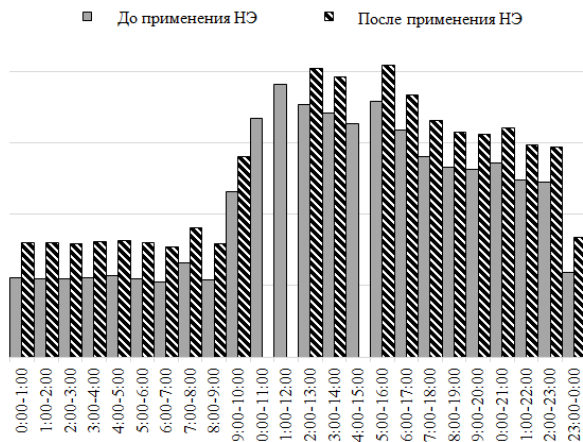


Рис. 1. Профиль мощности использования НЭ

Согласно авторству статьи по энергосбережению: «Значения почасовых значений ставок за электроэнергию c_{1t} и ставки за мощность $c_{2(3)}$ за август 2023 г. приведены в [4]. При расчете стоимости мощности применяется средняя мощность в часы максимального совокупного потребления электроэнергии, которая определяется в публикациях АО «Администратор торговой системы» по окончании каждого расчетного периода [6]. Таким образом, стоимость электроэнергии для потребителей III ценовой категории соответственно равна:

$$C_{\Sigma(3)} = C_{1(3)} + C_{2(3)} = \sum_t (P_t \cdot \Delta t \cdot c_{t(3)}) + \frac{C_{2(3)}}{n_{tk}} \cdot \sum_{tk} P_{tk}.$$

Изменение ставки в течение суток отражает общую нагрузку энергосистемы: в часы пиковых нагрузок цена на электроэнергию выше.

Для произведения расчетов необходимы данные месячного потребления ЭЭ для конкретной организации. В качестве при-

Секция 3

мерных данных взяты значения потребления для одного крупного магазина, именованного организация. Графики нагрузок приведены в таблицах [4] и [5].

По результатам анализу, расчетам потребления и часам пиков нагрузки на август месяц 2023 года для организации, выделены нагрузки по пиковым часам рис. 2.

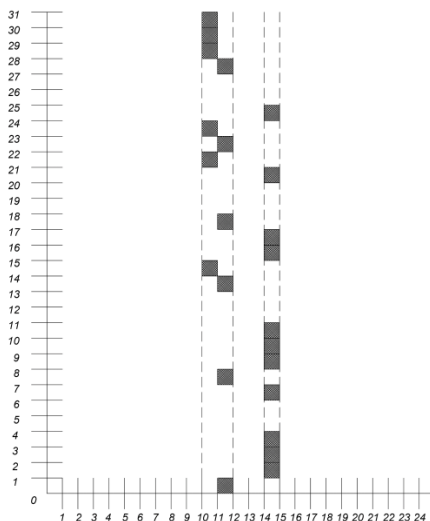


Рис. 2. Профиль мощности использования НЭ

Таким образом, расчет стоимости электроэнергии для потребителей III ценовой категории для организации произведен при использовании НЭ планируемых потребления ЭЭ в часы максимума нагрузки, а именно в 10, 11 и 14 часов соответственно потребляемая ЭЭ распределяется по другим часам, а стоимость электроэнергии с использованием накопителей энергии сведена в таблицу.

Таблица

Суммарная стоимость ЭЭ за месяц

Составляющие стоимости	$C_{1(все)} + C_{2(все)}$	$C_{1(все)}$	$C_{2(все)}$	$C_{2(кроме 10,11)}$	$C_{2(кроме 10,11,14)}$
Без учета НЭ	894143	745598	148545	139504	0
С учетом НЭ	738856	738856	0	—	—
Выгода	155287	—	—	—	—

Расчёт срока окупаемости внедрения накопителей электрической электроэнергии

Для расчета срока окупаемости внедрения накопителей электрической энергии необходимо учесть следующие факторы [3, 7]:

стоимость накопителя электроэнергии (цена за киловатт-час или за установку);

стоимость за 1 кВт-ч энергии;

стоимость НЭ для конкретной организации.

Экономия при оплате электроэнергии, которую можно достичь с помощью накопителей приведен расчет срока окупаемости.

Предполагается, что использование накопителя электроэнергии стоит 20 млн. руб. за 150 кВт-ч электроэнергии [1].

Далее произведен расчет стоимости 1 кВт-ч электроэнергии, для этого была стоимость НЭ поделена на его мощность:

$$20000000 / 150 = 133333 \text{ руб. за } 1 \text{ кВт-ч.}$$

Затем произведен расчет стоимости накопителя электроэнергии для рассматриваемой организации. Для этого умножена стоимость 1 кВт-ч на максимальную потребляемую мощность:

$$133333 \cdot 250 = 33333250 \text{ руб.}$$

Окончательно выполнен расчет времени, которое понадобится, чтобы окупилась стоимость накопителя электроэнергии. Для этого стоимость накопителя разделена на выгоду использования НЭ, умноженную на 12 месяцев использования:

$$33333250 / (155287 \times 12) = 17,9 \text{ года.}$$

Таким образом, в данном примере срок окупаемости внедрения накопителя электроэнергии составил 17,9 года.

Возможность использования накопителей электроэнергии

Использование накопителей электроэнергии может имеет ряд аспектов:

1. Высокая стоимость: использование накопителей электроэнергии может быть очень дорогостоящим. Накопители могут требовать больших инвестиций при покупке, установке и обслуживании. Также они могут потреблять дополнительную энергию при зарядке и разрядке.

2. Низкая эффективность: эффективность накопителей электроэнергии может быть относительно низкой. Большая часть энергии теряется в процессе зарядки и разрядки, что приводит к потере значительного количества энергии.

3. Ограниченная емкость: НЭ не могут хранить большое количество энергии. Это ограничение может быть проблематичным в случае необходимости долгосрочного хранения или больших объемов электроэнергии.

4. Экологические проблемы: изготовление и утилизация накопителей электроэнергии может иметь негативное воздействие на окружающую среду. Некоторые типы накопителей используют опасные химические вещества, которые могут негативно влиять на здоровье людей и окружающую среду.

5. Возможные технические проблемы: НЭ подвержены различным техническим проблемам, таким как потеря емкости, обрывы соединений или неудачные источники питания. Это может привести к потере электроэнергии или снижению их эффективности.

В целом, использование накопителей электроэнергии имеет свои преимущества, но также может иметь и некоторые нецелесообразные аспекты, о которых следует помнить при принятии решения о их использовании.

Выводы

1. Накопители энергии не всегда являются выгодной инвестицией, так как они обладают высокой стоимостью.

2. Накопители энергии требуют регулярного обслуживания и замены батарей, что также увеличивает их общую стоимость. Использование НЭ может быть оправдано только для резервирования таких потребителей как больницы, а так же оборудования, работающего в удаленных местах или для питания систем безопасности.

3. Развитие энергетических технологий продолжается, и, возможно, в будущем накопители энергии станут более доступными и экономически целесообразными. Однако на сегодняшний день, использование НЭ требует тщательного анализа преимуществ и возможностей, чтобы выяснить, является ли их

установка финансово оправданной и эффективной в конкретной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные накопители энергии. [Электронный ресурс]. URL: <https://pro-spec.ru/catalog/promyshlennye-nakopiteli-elektroenergii/promformat-ibp-ibpf-1280-ms-40kh32/> (дата обращения: 18.10.2023).
2. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки ЖК объекта для исследования систем «Генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло // Наука и техника. 2017. № 2. С. 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.
3. Расчет предельных уровней нерегулируемых цен / ПАО «ТНС энерго Марий Эл» [Электронный ресурс]. URL: <https://mari-el.tns-e.ru/disclosure/retail-market/raschet-predelnykh/> (дата обращения: 18.10.2023).
4. График нагрузок после использования НЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://img-host.ru/Z3o1U.png> (дата обращения: 18.10.2023).
5. График нагрузок до использования НЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://img-host.ru/k2QD4.png> (дата обращения: 18.10.2023).
6. Плановые часы пиковой нагрузки на 2023 год / АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2019/pik_chas2019.pdf (дата обращения: 18.10.2023).
7. Фактические данные для расчета предельных уровней нерегулируемых цен в ценовых зонах. Часы пиковой нагрузки [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour>. (дата обращения: 18.10.2023).

Авторы:

Сущенко В.С., студент 1 курса магистратуры электроэнергетического факультета, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет».

Швецов Р.С., студент 1 курса магистратуры электроэнергетического факультета, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет».

Ярков Д.А., студент 1 курса магистратуры электроэнергетического факультета, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет».

Орлов А.И., преподаватель, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет».

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАТОНКИХ ИНТЕРФЕЙСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

Иванов И.П., Романов В.В., Самуилов Д.В., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия

Михайлов А.В., АО «ВНИИР-Прогресс», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Приведены технические характеристики ультратонких интерфейсных реле ведущих электротехнических компаний, основные из которых, как ширина корпуса и прочность изоляции, определяют особенности конструкции, в первую очередь – магнитной системы. В результате предпроектной проработки по технологиям реверс-инжиниринга разработаны 3D-модели реле, выделены особенности конструкции и определены основные проектные параметры магнитной системы, которые рекомендованы для использования при проектировании новых реле.*

***Ключевые слова:** интерфейсное реле, особенности конструкции, магнитная система, характеристика, проектный параметр.*

Введение

Среди устройств, связывающих электрические цепи разного уровня напряжения и тока, широко распространены ультратонкие интерфейсные электромагнитные реле (УИЭР), которые, в основном, используются для передачи выходного сигнала программируемых логических контроллеров и электронных реле контроля на исполнительное устройство (контактор, автоматический выключатель, электродвигатель и т.п.). Для них характерно обеспечение гальванической развязки между системами (устройствами) с прочностью изоляции до 4 кВ. Некоторые типы УИЭР ведущих электротехнических компаний и их основные характеристики приведены в табл. 1.

На российском рынке под брендом российских организаций (КЭАЗ, ИЕК, ЕКФ и др.) предлагаются УИЭР китайского производства. Производство УИЭР в России отсутствует, поэтому актуальной является задача по разработке и освоению в России УИЭР, соответствующих по техническому уровню лучшим зарубежным аналогам и обладающих высоким качеством.

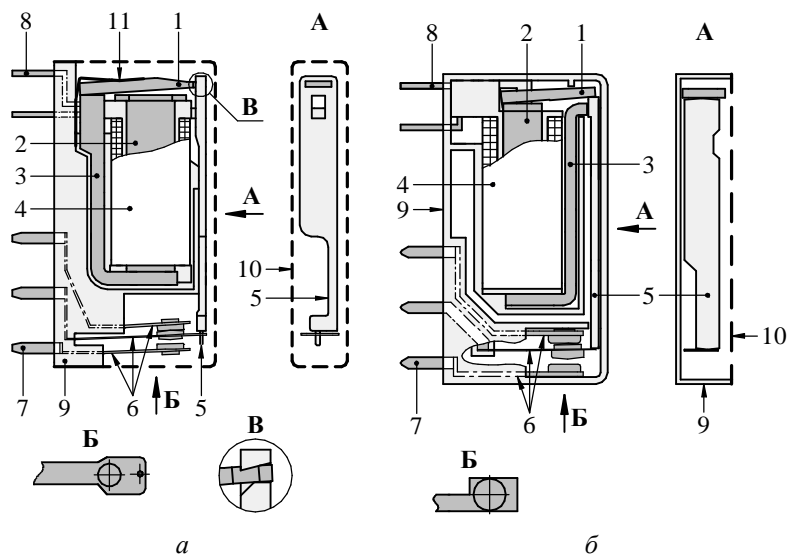
Основные параметры и характеристики УИЭР (по каталогам)

Наименование параметра, характеристики		Тип реле				
		34.51 (Finder) [1]	FTR-LY (Fujitsu) [2]	REL-MR (Phoenix Contact) [3]	SNR (Schrack) [4]	RP34 (КЭАЗ) [5]
Номинальный ток, А		6				
Номинальное напряжение, В	АС	250			240	250
	DC	–	24	–		30
Максимальная коммутируемая мощность, ВА/Вт	АС	1500				
	DC	–	144	140	–	180
Номинальное напряжение управления (DC), В		5÷60		4,5÷60	5÷48	5÷60
Потребляемая мощность, Вт		0,17	0,17÷0,22	0,17÷0,18	0,17÷0,22	0,17÷0,21
Коммутационная износостойкость, млн.		0,06	0,03	–	0,10	0,06
Электрическая прочность изоляции, кВ	разомкн. контакта	1,0				
	катушка – контакты	4,0				
Время включения / отключения, мс		5,0 / 3,0	8,0 / 4,0	5,0 / 2,5		8,0 / 4,0
Рабочая температура окружающей среды, °С		от минус 40 до 85				
Габаритные размеры (Ш×В×Г), мм		5×15×28				
Масса, г		5,0			6,0	5,0

Целью исследования является выявление особенностей конструкции современных УИЭР, которые могут быть использованы при проектировании усовершенствованных аналогов.

Методы исследования. Анализ и исследовательские испытания промышленных образцов.

Результаты исследований. Особенности конструкции УИЭР определяются их назначением и техническими характеристиками (табл. 1). Наибольшее влияние на конструкцию из всех характеристик оказывают маленькая толщина (5 мм) и высокая прочность изоляции (4 кВ). Эти отличия наглядно отображают упрощенные изображения наиболее характерных конструкций реле, выполненных на основе их 3D-моделей (рисунок).



Упрощенные изображения реле типа FTR-LY компании Fujitsu (*а*) и 34.51 компании Finder (*б*)

1 – якорь, 2 – сердечник, 3 – скоба (магнитопровод), 4 – катушка, 5 – траверса, 6 – контактная система, 7 – выводы контактной системы, 8 – выводы цепи управления, 9 – основание, 10 – кожух (крышка), 11 – пружина возвратная

По результатам анализа конструкции можно выделить, используя рисунок, следующие основные моменты. Магнитная система реле представляет собой клапанный электромагнит плоской конструкции, у которого якорь 1, сердечник 2 и скоба (магнитопровод) 3 содержат элементы переменного сечения

оригинальной формы, полученные высадкой, как например, полюсный наконечник на торце сердечника 2. Якорь 1 может быть подвешен на плоской пружине 11 (рисунок *a*) или находиться в свободном состоянии, зафиксированном в исходном положении с помощью траверсы 5 и силы пружины контактной системы 6 (рисунок *б*). Магнитные системы УИЭР имеют, в отличие от классических электромагнитов [6, 7], другие диапазоны геометрических параметров основных элементов (сердечника, скобы, полюсного наконечника, катушки). Конструкция контактной системы является традиционной, состоящей из плоских пружин и контактодержателей.

Характерным для УИЭР является размещение якоря и контактной системы по разные торцы конструкции, что удобно для сборки и регулирования. Выводы контактной системы 7 и выводы цепи управления 8 расположены по тому же принципу, что обеспечивает надежную изоляцию между ними.

Крышка 10 устанавливается на основание 9 сверху (рисунок *a*) или сбоку (рисунок *б*) и фиксируется герметично. В крышке, как правило, выполняется отверстие для выхода разогретого газа наружу, которое имеет размеры и конфигурацию, исключающие попадание пыли и влаги во внутрь корпуса.

В процессе анализа и исследований существующих конструкций УИЭР определены их проектные параметры, основные из которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные проектные параметры конструкции типопредставителей УИЭР (по экспериментальным данным)

Наименование параметра, характеристики		Тип реле		
		34.51 (Finder)	FTR-LY (Fujitsu)	RP34 (КЭАЗ)
Сила контактного нажатия P_k , Н		0,03÷0,04	0,05÷0,10	0,05
Начальная сила противодействия $P_{пр}$, Н		менее 0,05		
Раствор (δ_r) / провал (Δ), мм	размык. контакт	0,52 / 0,08	0,40 / 0,10	0,90 / 0,10
	замык. контакт	0,37 / 0,23	0,20 / 0,30	0,66 / 0,34
Магнитный зазор δ_m , мм		0,46	0,45	0,47

Значения этих параметров разных реле близки друг к другу. Некоторое отличие можно объяснить погрешностью измерений ввиду их малых значений.

Ввиду незначительных величин зазора δ_m , раствора δ_k и провала Δ контактов следует выделить следующую особенность: допуски на изготовление траверсы длиной от 22,7 до 23,4 мм (*Finder* и *Fujitsu* соответственно) могут составить значительную часть указанных параметров. Поэтому целесообразно при сборке изделий предусмотреть возможность калибровки траверсы либо механизированную регулировку контактных параметров.

Таким образом, в результате анализа каталожных данных и исследований образцов УИЭР выявлены характерные для них отличительные особенности конструкции и общие проектные конструктивные параметры, которые могут быть использованы при проектировании новых усовершенствованных УИЭР российского производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тип 34.51 Ультратонкие электромеханические реле для печатного монтажа | Finder [Электронный ресурс]. URL: <https://www.findernet.com/ru/russia/series/34-series-slim-p-c-b-relays-emr-or-ssr-0-1-2-6a-ru/type/type-3451-ultra-slim-electromechanical-pcb-relay-6a-ru/> (дата обращения 01.11.2023).

2. FTR-LY: Fujitsu Component [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fcl.fujitsu.com/en/products/details/FTR-LY> (дата обращения 01.11.2023).

3. Полупроводниковые и электромагнитные реле | Phoenix Contact [Электронный ресурс]. URL: <https://www.phoenixcontact.com/ru-ru/produkty/rele-i-optopary/poluprovodnikovye-i-elektromagnitnye-rele> (дата обращения 01.11.2023).

4. Slim PCB Relay SNR | Schrack [Электронный ресурс]. URL: https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/tyco/SNR_1014-572867.pdf (дата обращения 01.11.2023).

5. OptiRel G RP34 Ультратонкие промежуточные реле 6 А купить от производителя, каталог и цены — завод КЭАЗ [Электронный ресурс]. URL: <https://keaz.ru/catalog/ustroystva-releynoу-zaschiti-i-avtomatiki/promejutochnoe-rele-i-aksessuari-optirel-g/optirel-g-rp34-ultratronkie-promejutochnie-rele-6-a> (дата обращения 01.11.2023).

6. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.

7. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов (общие вопросы проектирования): учебное пособие для студентов электротехнических вузов / П.В. Сахаров. – М.: «Энергия», 1971. – 500 с.

Авторы:

Иванов Иван Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник АО «ВНИИР-Прогресс». В 1978 году окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Исследование и расчет магнитных систем герконов повышенной мощности». E-mail: ipivanov@vniir.ru.

Михайлов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, руководитель направления АО «ВНИИР-Прогресс», и.о. заведующего кафедрой электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 1998 году окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Усовершенствование методик синтеза оптимальных приводных электромагнитов низковольтных коммутационных аппаратов». E-mail: avmihailov@vniir.ru.

Романов Виссарион Вениаминович, ведущий инженер АО «ВНИИР-Прогресс». В 2011 году окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: vromanov@vniir.ru.

Самуилов Дмитрий Владимирович, научный сотрудник АО «ВНИИР-Прогресс». В 2018 году окончил магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: dsamuilov@vniir.ru.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ УЛЬТРАТОНКИХ ИНТЕРФЕЙСНЫХ РЕЛЕ

Иванов И.П., Самуилов Д.В., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия

Михайлов А.В., АО «ВНИИР-Прогресс», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Рассмотрены в качестве основных задач проектирования магнитных систем ультратонких интерфейсных реле определение магнитодвижущей и электромагнитной сил, используя при

этом численное моделирование в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*. Установлены влияния относительных геометрических параметров на распределение магнитного потока и индукции и на величину электромагнитной силы. Расчеты выполнены для характерных магнитных систем реле фирм *Fujitsu* и *Finder*. Результаты исследований рекомендованы к использованию при проектировании российских аналогов.

Ключевые слова: магнитная система, сердечник, полюсный наконечник, МДС, электромагнитная сила, магнитный поток, магнитная индукция

Введение

Ультратонкие интерфейсные электромагнитные реле (УИЭР) характеризуются присущими им проектными параметрами и особенностями конструкции¹, которые, в свою очередь, определяют подходы к проектированию этих реле.

Целью исследования является проработка вопросов проектирования магнитных систем (МС) УИЭР.

Результаты исследования. Проектирование современных аналогов УИЭР сводится, по сути, к решению ряда задач из технологии реверс-инжиниринга. При этом часть проектных параметров конструкции устанавливаются по результатам анализа данных существующих УИЭР*.

Первоочередными задачами проектирования МС при известных проектных параметрах являются:

- определение магнитодвижущей силы (МДС) МС;
- выявление зависимостей электромагнитной силы от отличительных геометрических параметров МС;

На рис. 1 и 2 приведены эскизы характерных МС УИЭР, выполненных на основе 3D-моделей образцов: *Fujitsu* и *Finder*. Их отличием от классических электромагнитов [1, 2] являются:

- большое соотношение H/c (более 3,85) и b_c/a_c (более 0,28), при этом меньшая сторона сердечника b_c обращена к скобе;

¹ Особенности конструкции ультратонких интерфейсных электромагнитных реле / И.П. Иванов, А.В. Михайлов, В.В. Романов, Д.В. Самуилов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. унта, 2023 (настоящий сборник).

Секция 3

- малая ширина системы ($b_m < 4$ мм);
- разнообразие формы полюсного наконечника; каркас в средней части выполнен открытым, где обмотка накладывается непосредственно на сердечник.

МДС срабатывания F_{cp} может быть определена по результатам расчета МС, исходя из равенства электромагнитной силы P , при разомкнутом якоре силе контактного нажатия размыкающего контакта. Рабочая МДС F_p выбирается с учетом обеспечения необходимого быстродействия, надежности переключения при предельных значениях параметров цепи управления и внешних воздействующих факторов с определенным запасом: $F_p = (1,15 \div 1,40) \cdot F_{cp}$ [1, 2]. По значению F_{cp} устанавливаются диаметр провода $d_{пр}$ и число витков N обмотки управления. Так, например, для МС реле *Fujitsu* по результатам расчета численным моделированием поля МДС срабатывания составляет $F_{cp} = 50$ А, а другие параметры: $F_p = 70$ А; $d_{пр} = 0,08$ мм; $N = 2000$.

Основными критериями выбора конфигурации и оптимальных геометрических размеров МС являются характер распределения магнитного потока и индукции, а также величина электромагнитной силы.

На рис. 1, б, в и рис. 2, б, в изображены расчетные зависимости распределения магнитного потока Φ в сердечнике и скобе, а также магнитной индукции B в системах (при $F = 70$ А). Расчеты выполнены также численным моделированием полей по 3D-моделям в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*.

Как следует из рисунков, для рассматриваемых МС характерен большой коэффициент рассеяния σ – до 2,1 (наибольшее при разомкнутом якоре, при $\varphi = 4^\circ$). Это до 1,75 раза больше, чем у распространенных классических электромагнитов [1]. Следовательно, с точки зрения полезного использования магнитной энергии цепи управления, такая система низкоэффективна. Однако, она вполне обеспечивает достижение основных технических характеристик реле (габаритов, номинального тока, электрической прочности изоляции, коммутационных параметров и т.п.).

Секция 3

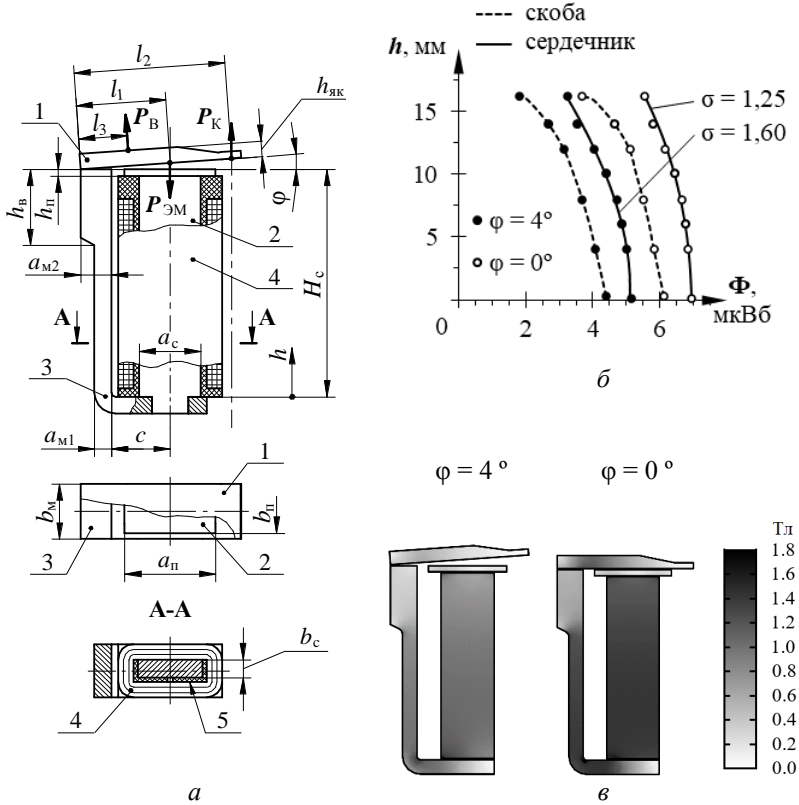


Рис. 1. Эскиз расчетной магнитной системы (а), распределение магнитного потока вдоль сердечника и скобы (б) и картины магнитного поля в разомкнутом и замкнутом состояниях (в) для реле Fujitsu
 1 – якорь, 2 – сердечник, 3 – скоба (магнитопровод),
 4 – катушка, 5 – каркас катушки

Величина индукции B (рис. 1, в и рис. 2, в) не превышает 1,8 Тл, что соответствует значениям сечения магнитопроводящих деталей близким к оптимальным. Результаты расчетов также показали, что изменения характерных геометрических параметров сердечника и скобы (a_c , b_c , h_b , c) в пределах, допустимых габаритами УИЭР, влияют на распределение потока и индукции незначительно (не более 10 %).

Секция 3

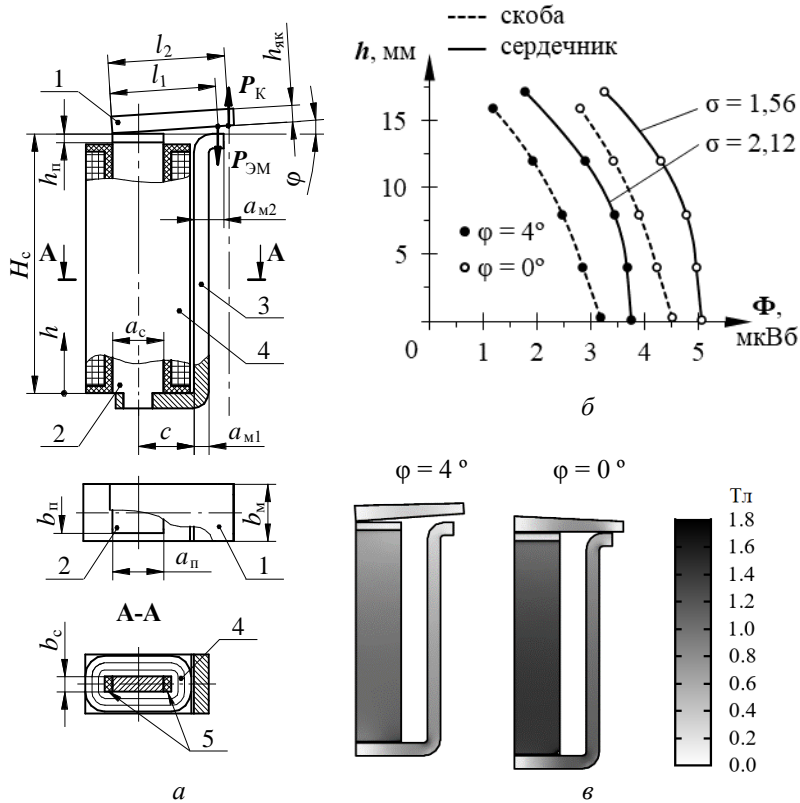


Рис. 2. Эскиз расчетной магнитной системы (а), распределение магнитного потока вдоль сердечника и скобы (б) и картины магнитного поля в разомкнутом и замкнутом состояниях (в) для реле Finder
 1 – якорь, 2 – сердечник, 3 – скоба (магнитопровод),
 4 – катушка, 5 – каркас катушки

В связи с ограниченностью объема торцевой части МС УИЭР наибольший интерес представляет установление влияния на электромагнитную силу геометрических параметров полюсного наконечника. Результаты этих исследований представлены в виде графических зависимостей на рис. 3. Расчеты выполнены при одинаковых исходных данных: $F_{cp} = 50 \text{ A}$, $\varphi = 4^\circ$.

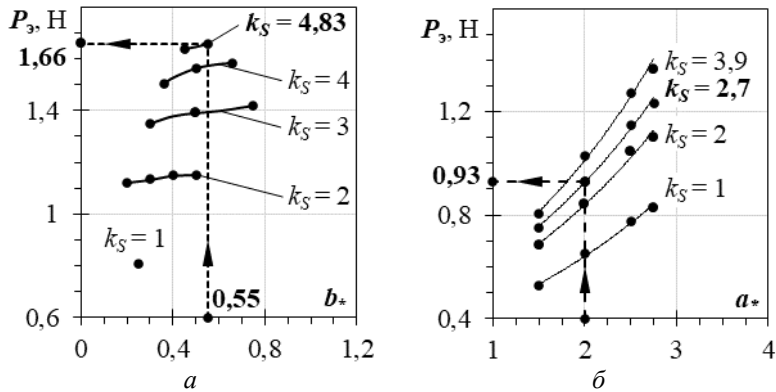


Рис. 3. Зависимости электромагнитной силы от соотношений геометрических параметров полюсного наконечника для магнитной системы реле Fujitsu (а) и Finder (б)

В расчетах исследовалось влияние величин $b_* = b_{\text{п}}/a_{\text{п}}$ (для реле *Fujitsu*, рис. 1) и $a_* = a_{\text{м2}}/a_{\text{м1}}$ (для реле *Finder*, рис. 2, $a_{\text{м1}} = \text{const}$) при различных значениях параметра $k_S = S_{\text{п}}/S_{\text{с}}$ ($S_{\text{п}}$ и $S_{\text{с}}$ – площади поперечного сечения полюсного наконечника и сердечника соответственно). Величина $S_{\text{с}}$ оставалась постоянной: для реле *Fujitsu* $S_{\text{с}} = 4,84 \text{ мм}^2$, для реле *Finder* $S_{\text{с}} = 3,50 \text{ мм}^2$.

В МС реле *Fujitsu* (рис. 3, а) наибольшее усилие достигается уже при $k_S = 4,83$. Дальнейшее увеличение k_S , вплоть до значений $5,0 \div 5,5$ незначительно сказывается на величине P_3 (не более 5%). Уменьшение k_S приводит к снижению P_3 . Так, при $k_S = 2$ величина P_3 уменьшается на $15 \div 20 \%$ от значений при $k_S = 4,83$. При неизменном значении k_S соотношение сторон полюсного наконечника практически не влияют на P_3 .

Для МС реле *Finder* (рис. 3, б) полученные зависимости $P_3(a_*)$ при неизменном значении k_S имеют экспоненциальный характер. С увеличением k_S растет и величина P_3 , достигая максимального значения при $k_S = 3$. Дальнейшее увеличение k_S , вплоть до значения 3,9 незначительно сказывается на величине P_3 (не более 5%).

На рис. 3 пунктирными линиями показаны фактические значения параметров для образцов. В реле *Fujitsu* геометрические размеры практически являются оптимальными, а в реле

Finder изменением соотношений размеров a^* и k_5 можно увеличить P_3 на 30 % (с учетом технологических возможностей).

Выводы

1. Получены графические зависимости магнитного потока, магнитной индукции и электромагнитной силы от характерных геометрических параметров МС с учетом возможного диапазона изменений их значений.

2. Результаты исследований рекомендуется использовать при разработке и освоении производства новых УИЭР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гордон А.В.* Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.

2. *Сахаров П.В.* Проектирование электрических аппаратов (общие вопросы проектирования): учебное пособие для студентов электротехнических вузов / П.В. Сахаров. – М.: «Энергия», 1971. – 500 с.

Авторы:

Иванов Иван Петрович, см. стр. 291.

Михайлов Алексей Валерьевич, см. стр. 291.

Самуилов Дмитрий Владимирович, см. стр. 291.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ПРИМЕРЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Петрова Р.М., Грачева Е.И., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

Аннотация. В статье исследованы основные законы распределения: нормальный, экспоненциальный (показательный), распределение Вейбулла и закон Релея, позволяющие моделировать надежность низковольтных электрических аппаратов. Приведен график изменения статистических и теоретических функций вероятности безотказной работы и появления отказа на примере автоматических выключателей марки ВА51-35.

Ключевые слова: анализ надежности, закон распределения, низковольтные коммутационные аппараты; автоматический выключа-

тель; нормальный закон распределения; вероятность безотказной работы; вероятность появления отказа, интенсивность отказа.

Актуальностью данного исследования является совершенствование методов определения параметров надежности низковольтного электрооборудования систем электроснабжения по статистическим эксплуатационным данным [1].

Материалы и методы

Для прогнозирования надежности электрооборудования низковольтных сетей предлагается использовать сравнение статистических и теоретических значений функции распределения вероятностей безотказной работы и появления отказа. Прогнозирование надежности может быть произведено только на основе вероятностного подхода. При этом необходимо выбрать закон распределения для расчета отказов систем электроснабжения, являющиеся случайными величинами, наиболее близко совпадающий с эмпирической функцией распределения [2, 3].

Выбор закона распределения для расчета вероятности безотказной работы встречает определенные трудности, связанные с тем, что истинный характер распределения отказов низковольтного электрооборудования различный. Кроме того, по мере эксплуатации одного и другого электрооборудования на разных производственных предприятиях могут быть расхождения в данных по отказам из-за климатических условий и нагрузки на оборудование. С данной целью необходимо выбрать оптимальный закон распределения. Для этого изучим основные законы распределения, а именно нормальный, экспоненциальный (показательный) законы и распределение Вейбулла, используемые в теории надежности и определим оптимальный из них в сравнении с эмпирическими значениями функции.

Эмпирическая функция вероятности безотказной работы имеет вид [4]:

$$P^*(t_i) = \frac{N_0 - n_i(t)}{N_0}$$

где $n_i(t)$ – суммарное число отказавших элементов, шт.;

N_0 – количество рассматриваемых элементов, шт.

Эмпирическая функция вероятности появления отказа записывается в виде [1]:

$$Q^*(t_i) = \frac{n_i(t)}{N_0};$$

$$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i).$$

При нормальном законе распределения (также называется распределение Гаусса) теоретическая функция вероятности безотказной работы имеет вид [2-3]:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{сред}} - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{сред}}}{\sigma}\right)}$$

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

где t – время наблюдения, год; $T_{\text{сред}}$ – средняя наработка на отказ, год; σ – среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, год; F – функция Лапласа [5].

При расчетах экспоненциальным (показательным) законом распределения функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

где λ – интенсивность отказов, $\lambda = \text{const}$.

Распределение Вейбулла:

$$P(t) = \exp(-\lambda t^b)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t^b)$$

где λ – параметр масштаба; b – параметр формы (безразмерная величина).

Закон Релея имеет вид:

$$P(t) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right)$$

$$Q(t) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, год.

Нормальный и экспоненциальный (показательный) законы распределения образуют своеобразные крайние положения: при

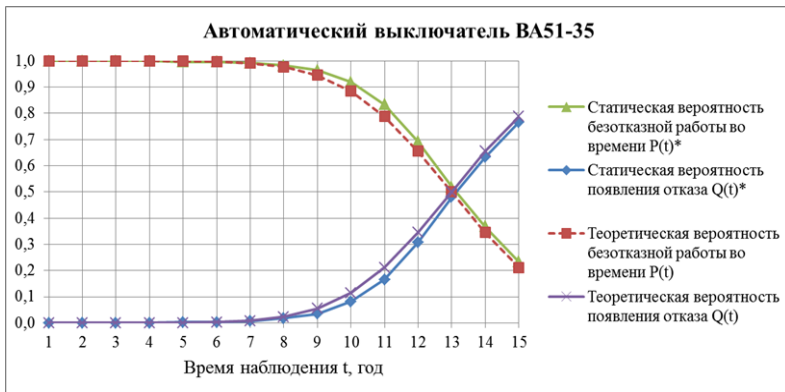
нормальном законе интенсивность отказов λ имеет возрастающий вид; при экспоненциальном законе имеет постоянное значение λ . На практике наиболее распространение получили именно эти два закона распределения.

Предположим, что параметры надежности низковольтного электрооборудования систем электроснабжения подчиняются нормальному закону распределения. Проверим данное предположение на основе автоматических выключателей марки ВА51-35 завода-изготовителя КЭАЗ, г. Курск.

Результаты исследования

На рисунке показаны графики изменения статистических и теоретических функций вероятности безотказной работы и появления отказа за время наблюдения, равное 15 годам, для автоматических выключателей ВА51-35.

Произведем проверку на соответствие выбранного закона распределения с помощью критерия Колмогорова и критерия Пирсона (χ -квадрат).



Статистическая и теоретическая вероятность безотказной работы P и появления отказа Q во времени t для автоматических выключателей ВА51-35 по годам

Воспользуемся критерием Колмогорова при малых испытаниях (>100). Мера расхождения между теоретическими и экспериментальными величинами D_n вычисляется по формуле: [1]

$$D_n = \max |F^*(x) - F(x)|$$

Секция 3

где $F^*(x)$ – эмпирическая функция распределения;
 $F(x)$ – выбранная теоретическая функция распределения.

Значение случайной величины рассчитывается по формуле:

$$y_n = D_n \sqrt{n}$$

где n – количество отказавших элементов.

В таблице приведены значения показателей критерия Колмогорова $P(y_n)$. Определим вероятность согласия $P(y_n)$ теоретического и эмпирического распределений по табличным данным для y_n . По значениям случайной величины y_n определяется функция $P(y_n)$, используя линейную интерполяцию. Если $P(y_n) > 0,05$, то условие согласия является удовлетворительным.

Таблица

Значения показателей критерия Колмогорова

y_n	$P(y_n)$	y_n	$P(y_n)$	y_n	$P(y_n)$	y_n	$P(y_n)$
0,0	1,00000	0,8	0,5441	1,6	0,0120	2,4	0,000020
0,05	1,00000	0,85	0,4653	1,65	0,0086	2,45	0,000012
0,1	1,00000	0,9	0,3927	1,7	0,0062	2,5	0,0000075
0,15	1,00000	0,95	0,3275	1,75	0,0044	2,55	0,0000044
0,2	1,00000	1,0	0,2700	1,8	0,0031	2,6	0,0000026
0,25	1,00000	1,05	0,2202	1,85	0,0021	2,65	0,0000016
0,3	0,99999	1,1	0,1777	1,9	0,0015	2,7	0,0000010
0,35	0,99997	1,15	0,1420	1,95	0,0010	2,75	0,0000006
0,4	0,99972	1,2	0,1122	2,0	0,0007	2,8	0,0000003
0,45	0,9874	1,25	0,0879	2,05	0,0004	2,85	0,00000018
0,5	0,9639	1,3	0,0681	2,1	0,0003	2,9	0,00000010
0,55	0,9228	1,35	0,0522	2,15	0,0002	2,95	0,00000006
0,6	0,8643	1,4	0,0397	2,2	0,0001	3,0	0,00000003
0,65	0,7920	1,45	0,0298	2,25	0,0001		
0,7	0,7112	1,5	0,0222	2,3	0,0001		
0,75	0,6272	1,55	0,0164	2,35	0,000032		

Критерий Пирсона (или критерий χ^2) применяется для проверки гипотезы о соответствии теоретического и эмпирического распределения при большом объеме выборки ($n \geq 100$). Данный

метод не применим для проверки, так как используется при многопараметрических распределениях.

Заключение

В результате проведенных исследований на основании данных эксплуатации параметров надежности электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения ряда предприятий г. Казани:

1. Наиболее подходящим является нормальный закон распределения при моделировании надежности систем электроснабжения.

2. Произведена проверка на соответствие закона распределения с использованием критерия Колмогорова.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петрова Р.М., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim.* Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 93–105.

2. *Петрова, Р.М.* Анализ надежности электрооборудования цеховых сетей // Материалы конференции XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (20–22 октября 2022 г.) / редкол. А.Г. Арзамасова (отв. редактор). – Казань: ООО «Фолиант», 2022. – С. 206–209.

3. *Петрова Р.М., Грачева Е.И.* Выбор оптимального закона распределения при оценке надежности электрооборудования низковольтных распределительных сетей / Материалы международной научно-практической конференции «Электроэнергетика СНГ: современное состояние и перспективы развития», посвященной 32-летию Независимости Республики Таджикистан и 10-летию филиала НИУ «МЭИ», г. Душанбе, 19 октября 2023 года: Материалы международной конференции. – Душанбе: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Душанбе, 2023. – С. 22–25.

4. *Петрова Р.М.* Исследование надежности автоматических выключателей внутрицеховых систем электроснабжения / Молодые исследователи – регионам: материалы Международной научной конференции (Вологда, 17 апреля 2023 г.) / Министерство науки и высшего

образования Российской Федерации и др.; [главный редактор Л.О. Ко-чешкова]. – Вологда: ВоГУ, 2023. – С. 71–73. – Текст: электронный.

5. Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследования показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 9–10.

Авторы:

Петрова Рената Маратовна, аспирант кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: 1998renata@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). 2014 г., «Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий». E-mail: grachieva.i@bk.ru.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕРКИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЗА С НИЗКОВОЛЬТНЫМИ ВХОДАМИ

Гаврилов А.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия

Шалимов А.С., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В данном докладе рассматриваются особенности применения блока сопряжения с низковольтными входами для испытаний микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, использующих систему измерения, предусматривающую применение комплексных датчиков тока и напряжения на основе катушек Rogowski и делителей напряжения.

Ключевые слова: релейная защита, реклоузер, испытательная система, катушка Rogowski, делители напряжения

В связи с расширением применения микропроцессорных устройств (терминалов) релейной защиты и автоматики (РЗА) электрических сетей 6-35 кВ, основанных на измерении первичных значений измеряемых сигналов посредством комбиниро-

ванных датчиков тока и напряжения на основе катушек Роговского и ёмкостно-резистивных делителей напряжения, существует проблема обеспечения полного спектра ручных и автоматических пуско-наладочных, периодических и послеаварийных испытаний данных устройств. Для таких устройств РЗА существуют особенности имитации вторичных значений тока и напряжения проверочными установками [1].

Испытательные устройства, такие как РЕТОМ-51/61/71 предназначены для работы с входными преобразователями устройств релейной защиты с номинальным током 1(5) А и напряжением 100 В, и не могут обеспечить проверку всего диапазона параметров срабатывания (уставок) для предусмотренных функций РЗА в диапазонах вторичных значений от 10 до 100 мВ. Таким образом, существует необходимость в использовании специального оборудования или дополнительных блоков для преобразования аналоговых сигналов подаваемых на низковольтные входы терминалов.

Рассматриваемым устройством РЗА в данном исследовании является реклоузер 6-10 кВ (фирмы «Таврида Электрик»), состоящий из вакуумного коммутационного модуля, встроенной системы измерения токов и напряжения, а также шкафа управления с микропроцессорной системой РЗА.

Блок управления реклоузера (далее – терминал) типа СМ_15 включает в состав функций основные виды защит и автоматики, применяемые на линиях и пунктах секционирования 6-35 кВ: 3-х ступенчатую максимальную токовую защиту (МТЗ), защиту от однофазных замыканий (ОЗЗ), защиту минимального напряжения (ЗМН), автоматическую частотную разгрузку (АЧР), автоматику повторного включения (АПВ), функцию контроля напряжения (КН), защиту от обрыва фазы (ЗОФ) [2].

Система измерения первичных цепей коммутационного модуля состоит из комбинированных датчиков тока и напряжения, которые представлены катушками Роговского и делителями напряжения в различных комбинациях (табл. 1). Таким образом необходима подстройка соответствующих режимов испытательного комплекса (например, переключение между дифференцирующим и прямым режимом преобразования).

Применяемые типы датчиков тока и напряжения для различных исполнений коммутационного модуля СМ_15

Тип коммутационного модуля СМ_15	Напряжение стороны ABC	Напряжение стороны RST	Ток ABC
OSM35_Smart_1	CR	RR	Rog
ISM15_Mono_1	CR	RR	Rog
ISM15_LD_1	CR	RR	Rog
ISM25_LD_1	CR	RR	Rog
OSM15_AI_1	CC	CC	Rog
OSM25_AI_1	CC	CC	Rog
ISM15_LD_8	CR	RR	Rog

Примечание: CR – емкостно-резистивный делитель; CC – емкостный делитель; Rog – катушка Роговского; RR – резистивный делитель.

Принцип действия первичного преобразователя на основе катушки Роговского заключается в возникновении ЭДС в замкнутом контуре, пропорциональной протекающему в проводнике току:

$$e(t) = -M \cdot \frac{dI_1(t)}{dt},$$

где M – коэффициент взаимной индукции, $I_1(t)$ – первичное значение тока, А.

Для получения значения исследуемого тока в интеграторе коммутационного модуля выполняет интегрирование сигнала выходного напряжения.

Преобразователи на основе делителей напряжения разного типа (табл. 1), преобразуют в выходной сигнал напряжение, пропорциональное первичному напряжению сети. Соотношение между первичным и вторичным сигналами, для случая резистивного делителя, определяется следующим выражением:

$$U_2(t) = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot U_1(t),$$

где $U_2(t)$ – выходной сигнал, В; $U_1(t)$ – входной сигнал, В; $R1, R2$ – сопротивления плеч делителя, Ом.

Таким образом, учитывая физическую природу средств измерения рассматриваемого устройства РЗА, существует необходимость при проверке уставок подавать сигналы не тока и напряжения, а напряжения пропорционального току и напряжения пропорционального напряжению с соответствующими коэффициентами преобразования кА/мВ и кВ/мВ.

Одним из вариантов реализации испытательного комплекса для проверки терминалов с низковольтными входами, является использование блока сопряжения, выполняющего преобразование выходных сигналов проверочного прибора для РЗА с измерительными датчиками, предназначенными для электромагнитных измерительных трансформаторов. В качестве примера, далее рассматривается применение блока сопряжения типа РЕТ-НИТ (ООО «НПП «Динамика»). Схема подключения рассматриваемого комплекса представлена на рис. 1.

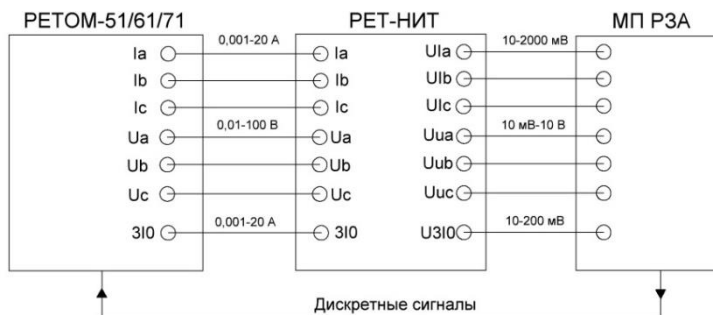


Рис. 1. Схема подключения блока сопряжения при проверке РЗА с низковольтными входами

Блок РЕТ-НИТ осуществляет преобразование сигналов тока и напряжения от приборов типа РЕТОМ-51/61/71, с возможностью переключения между режимом дифференцирующего и прямого преобразования [3], для согласования с типом первичного комбинированного датчика тока и напряжения (табл. 1).

Пример работы дифференцирующего режима РЕТ-НИТ приведён на осциллограмме сигналов выходного напряжения, представленной на рис. 2. Смещение между током и напряжением одной фазы составляет 90° .

Секция 3

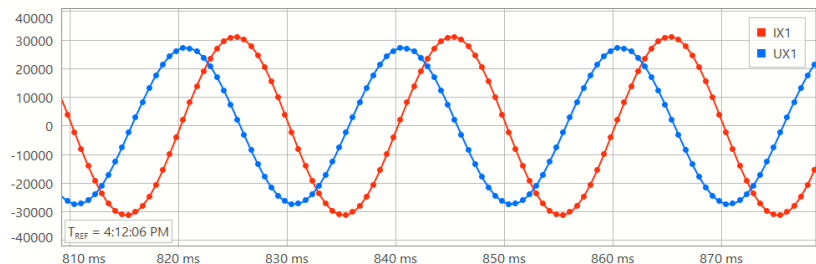


Рис. 2. Осциллограмма выходных сигналов РЕТ-НИТ

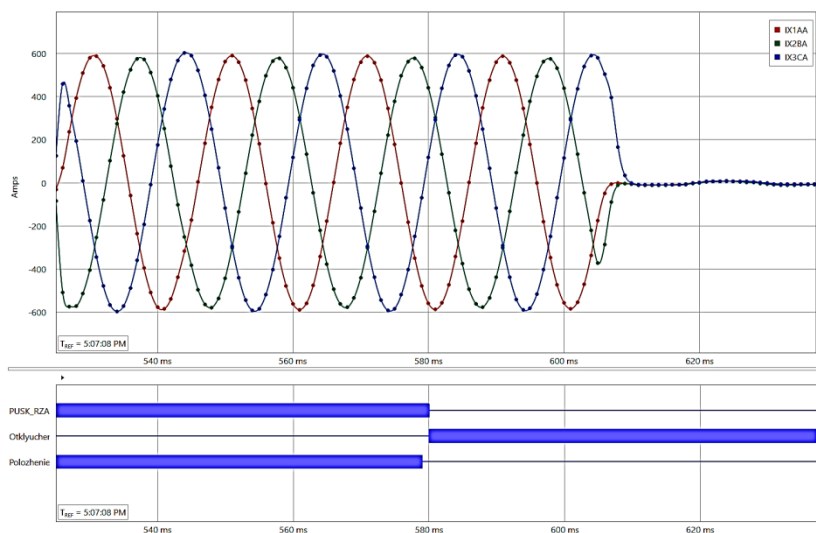


Рис. 3. Осциллограмма первичных значений терминала при автоматизированной проверке функции МТЗ

Низковольтный блок сопряжения РЕТ-НИТ включает [4]:

1) 6 преобразователей входных сигнала тока (в двух группах по 3 фазы в каждой группе), имеющих два режима для выдачи пропорционального (прямого) сигнала и первой производной для организации проверки всех типов токовых защит, включая дифференциальную защиту.

2) 6 преобразователей сигнала напряжения, для организации проверки всех типов защит с каналами напряжения, включая АВР.

3) Преобразователь тока канала $3I0$ для проверки функционирования защиты от замыканий на землю с чувствительными уставками по току срабатывания.

Выдаваемые, посредством приборов типа РЕТОМ-51/61/71 сигналы тока и напряжения преобразуются в РЕТ-НИТ в низковольтные значения сигналов напряжения и подаются на модуль управления реклоузера. Программное обеспечение (ПО) РЕТОМ-51/61/71 [5] учитывает соответствующие коэффициенты преобразования терминала. Диапазон выдаваемых значений, требуемых для проверки параметров срабатывания обеспечивается с заданной точностью.

Пересчёт первичных значений с учётом коэффициента преобразования блока и непосредственно терминала иллюстрирует таблица проведённых измерений:

Таблица 2

Результаты измерений с учётом коэффициентов преобразования коммутационного модуля

	Выдача с РЕТОМ-71, В, А	Датчик коммутационного модуля		
		ISM15_LD_1		
		k , мВ/кВ (В/кА)	V/k , кВ I/k , А	Измерение, кВ (А)
Ua	10	22,6	44,25	44,27
Ub	10	22,6	44,25	44,26
Uc	10	22,6	44,25	44,26
Ia	1	2,8	357	352
Ib	1	2,8	357	352
Ic	1	2,8	357	353
$3I0$	10	680	14,7	14,69

Из табл. 2 видно, что соответствие измеренных вторичных значений соответствует расчётным значениям, пересчитанным с коэффициентом k . При этом относительная погрешность для выходного сигнала напряжения не превышает 2%.

С указанным составом каналов преобразования блок РЕТ-НИТ обладает многофункциональностью, возможностью реали-

зации разных вариантов схем автоматических проверок с любыми типами и сочетаниями устройств РЕТОМ-51/61/71.

Выводы

Блок сопряжения РЕТ-НИТ может применяться при проверках РЗА с низковольтными входами в ручном, автоматическом режиме и при создании со специального ПО автоматизированных проверок устройств РЗА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова Т.В. Проверка терминалов релейной защиты и реклоузеров с низковольтными входами. Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апреля 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 30-34.

2. ВВ/TEL-10. Вакуумный выключатель. Руководство по эксплуатации. TER_CBdoc_UG_13. Версия 4.1 от 10.2019. Москва, 2019. – С. 15-16.

3. Гаврилов А.А. Особенности использования низковольтного измерительного трансформатора РЕТ-НИТ для проверки микропроцессорных устройств РЗА. Юность Большой Волги: сборник статей лауреатов XXV Межрегиональной конференции фестиваля научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги», 2023. – С. 39-44.

4. Гаврилов А.А. Казакова Е.Ю. Использование низковольтного измерительного трансформатора РЕТ-НИТ для проверки терминала РЗА реклоузера. Наука. Наследие. Университет: сборник материалов международной 57-й научной студенческой конференции, 2023. – С. 56-66.

5. Комплекс программно-технический измерительный РЕТОМ-71. Руководство по эксплуатации БРГА.441323.035 РЭ. Редакция 22.12.22. Чебоксары, 2022. – С. 22.

Авторы:

Гаврилов Алексей Алексеевич, см. стр. 101.

Шалимов Александр Станиславович, см. стр. 55.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНО-ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОДНОПОЛЮСНЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНТАКТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Васильев Е.Г., Иванов И.П., Филатов А.Е., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия

Михайлов А.В., АО «ВНИИР-Прогресс», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В результате анализа особенностей конструкций и ключевых эксплуатационных параметров однополюсных герметичных контакторов (ОГК) ведущих электротехнических производителей выявлены основные проектные параметры их контактно-дугогасительных систем (КДС). Предложено разделить существующие КДС ОГК по виду магнитного дутья на две группы. В каждой из них выделены КДС, отличающиеся по количеству и направлению намагниченности постоянного магнита, наличию и виду вспомогательного магнитопровода.*

***Ключевые слова:** герметичный контактор, контактно-дугогасительная система, постоянный магнит, сила Лоренца.*

Выявление особенностей конструкции контактно-дугогасительных систем (КДС) существующих однополюсных герметичных контакторов (ОГК) постоянного тока является одной из первоочередных задач при проектировании новых ОГК. ОГК производятся многими зарубежными компаниями, как например, *TE Connectivity/Kilovac* (США) [1], *Sensata Technologies/Gigavac* (США) [2], *TDK* (Япония) [3], *Ebusbar* (Китай) [4], *Fuji Electric* (Китай) [5] и т.д., и применяются в различных областях: в системах электроснабжения с аккумуляторными источниками питания наземного и воздушного транспорта, космической технике и автономных объектах специального назначения, в солнечных и ветряных электростанциях и т.п.

Особенности конструкции ОГК и их основных узлов определяют как область их применения, так и основные эксплуатационные параметры. В табл. 1 приведены ключевые параметры сильноточных ОГК, а также, как пример, параметры характерного типопредставителя.

Секция 3

Основу конструкции КДС ОГК (рис. 1) составляют контактный мостик, два вывода, выполненных в большинстве серий разных производителей в виде цилиндра, дугогасительная камера и один или несколько постоянных магнитов. Гашение дуги больших токов и напряжений в такой конструкции ограниченных размеров обеспечивается за счет магнитного дутья полем постоянного магнита в газовой среде (водорода, азота или их смеси). Магнитное поле имеет направление, при котором дуга под действием силы Лоренца (P_L) перемещается к наружным краям контактов (к торцам мостика).

Таблица 1

Ключевые параметры ОГК, определяющие их особенности

Наименование параметра	Значение параметра
<i>Общие параметры силовых контакторов базовой номенклатуры</i>	
Номинальные токи (I_n), А	от 100 до 1000
Номинальные напряжения DC, В	от 12 до 1500
Степень защиты корпуса	IP 67 (IP 54)
Максимальная рабочая температура, °С	+85 °С (+70 °С; +105 °С)
Удельный объем, см ³ /А	от 0,93 до 1,49
<i>Параметры типопредставителя (контактор EVC250, Ebusbar)</i>	
Номинальный ток, А	250
Диапазон коммутируемых токов, А	от 1 до 250
Напряжение цепи управления DC, В	3–36; 12; 24
Габаритные размеры (Ш×В×Г), мм	80×73×56
Масса, кг, не более	0,38

В некоторых конструкциях, как например, в КДС с поперечным направлением поля относительно главной плоскости (плоскости OO' на рис. 1) при коммутации токов разной полярности возможно смещение дуги к центру мостика, что может привести к значительному снижению коммутационных характеристик [6].

Основные проектные параметры (характеристики) КДС разных типов (серий) ОГК на одинаковые токи I_n отличаются незначительно (табл. 2). Так, например, при $I_n = 500$ А: $\delta_p = (1,4 \div 1,7)$ мм, $B_m = (20 \div 50)$ мТл. Характерно, что величина

Секция 3

B_m не зависит от I_n . Однако, конструкции магнитных систем дугогашения ОГК разных производителей могут отличаться значительно. Основными отличиями являются:

количество магнитов, их размещение и направление намагниченности относительно главной плоскости;

наличие и форма дополнительных магнитопроводов, предназначенных для создания определенной концентрации магнитного поля в зоне горения дуги.

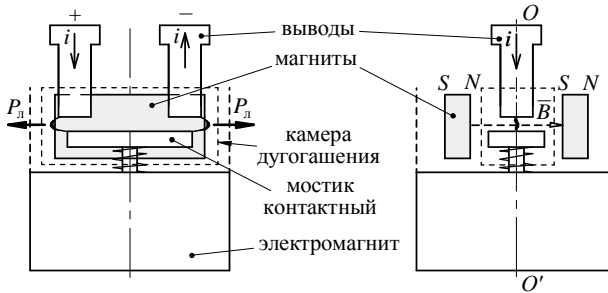


Рис. 1. Схематичное изображение основных узлов и деталей конструкции ОГК постоянного тока

Таблица 2

Характеристики КДС типопредставителей ОГК

Тип контактора	I_n , А	δ_p , мм	Размеры магнита, мм	B_m , мТл	Тип КДС
EV200 (Kilovac)	500	1,45	29,9×11,2×5,1	17,0÷20,0	рис. 2, а
EVC250A (Ebusbar)	250	1,40	36,6×12,5×7,6 34,0×12,5×3,1	35,0	рис. 2, б
HVC500B (TDK)	500	1,40	15,0×15,0×2,5	36,8	рис. 3, а
USC50 (IVELVAC)	500	1,70	30,5×16,0×2,6	48,9	рис. 3, б
USC10 (IVELVAC)	100	0,80	10,6×11,5×2,8	35,0	рис. 3, в
SVE135 (Fuji Electric)	135	—	—	—	рис. 3, г

Примечания: δ_p – раcтвор контактов; B_m – магнитная индукция постоянных магнитов в средней точке между контактами

Сравнительный анализ КДС удобно выполнить, разбив их на группы. Такая классификация может быть выполнена по раз-

Секция 3

ным признакам (принципу действия, конструктивным параметрам и т.п.). По результатам анализа технической литературы и конструкций образцов характерных типопредставителей ОГК предлагается разделить КДС ОГК по виду магнитного дутья дуги на две группы:

- КДС с продольным магнитным дутьем (рис. 2);
- КДС с поперечно-комбинированным дутьем (рис. 3).

В каждой из этих групп выделены КДС, отличающиеся по конструктивным признакам (на рис. 2 и 3 слева изображен вид сверху).

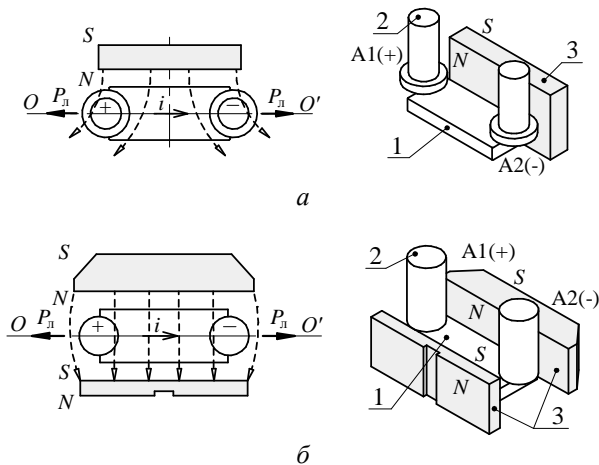


Рис. 2. КДС ОГК с продольным магнитным дутьем:
а – с одним магнитом (*EV200*); *б* – с двумя магнитами (*EVC250A*):
 1 – мостик; 2 – выводы; 3 – магниты

В целях графической иллюстрации действия силы магнитного дутья (силы Лоренца) на рисунках изображена качественная картина магнитного поля магнита, построенная по результатам численного моделирования в программном комплексе *Comsol Multiphysics*. В качестве примера, на рис. 4 приведены результаты расчетов для двух характерных типопредставителей ОГК.

Для КДС первой группы характерна ориентированность на направление тока, т.е. такие КДС являются поляризованными и

Секция 3

при эксплуатации ОГК с такими КДС важно соблюдать полярность при подключении к главной цепи, что несколько усложняет их применение. Однако они просты по конструкции и находят достаточно широкую область применения.

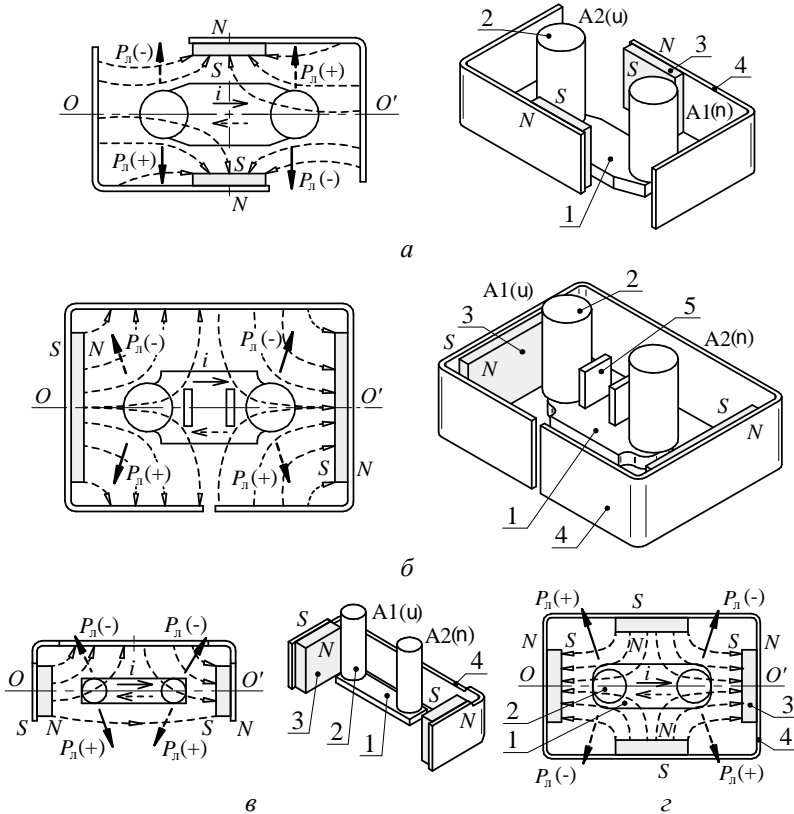


Рис. 3. КДС ОГК с поперечно-комбинированным магнитным дутьем: а – с двумя магнитами, размещенными однополярно параллельно мостику и двум скобами (HVC500B); б – с двумя магнитами, размещенными разнополярно по торцам мостику и одной скобой прямоугольного контура (USC50); в – с двумя магнитами, размещенными разнополярно по торцам мостику и одной П-образной скобой (USC10); г – с четырьмя магнитами, размещенными попарно однополярно по бокам и торцам мостику и скобой прямоугольного контура (SVE135):

1 – мостик; 2 – выводы; 3 – магниты; 4 – скоба

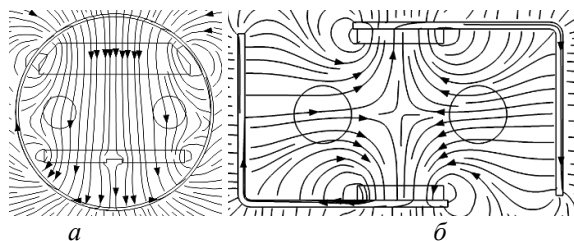


Рис. 4. Картины распределения магнитного поля в главной плоскости КДС (численное моделирование в *Comsol Multiphysics*): *а* – для контактора *EVC250A* (рис. 2, *б*); *б* – для контактора *HVC500B* (рис. 3, *а*)

В КДС второй группы обеспечивается гашение дуги тока разной полярности. Исходя из конструктивных соображений общей компоновки ОГК может быть использован любой вариант из приведенных на рис. 3.

Более равномерное поле в зоне контактов, при котором возможно надежное гашение дуги токов широкого интервала, обеспечивается в КДС со скобой замкнутого контура с двумя магнитами (рис. 3, *б*) и с четырьмя магнитами (рис. 3, *з*).

Из КДС второй группы наиболее технологичной является КДС с двумя магнитами (рис. 3, *а*).

Выводы

1. Предложено разделение КДС ОГК по виду магнитного дутья на две группы. Выделены подгруппы по количеству и направлению намагниченности магнита, наличию и виду вспомогательного магнитопровода.

2. Отмечены характерные отличия наиболее распространенных типопредставителей КДС.

3. Результаты исследования рекомендуются использовать при проектировании современных ОГК российского производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Contactors Kilovac [Электронный ресурс]. URL: <https://www.te.com/usa-en/products/brands/kilovac.html?tab=pgp-story> (дата обращения: 03.07.2023).
2. Contactors Gigavac [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sensata.com/products/gigavac-power-contactors-fuses> (дата обращения: 03.07.2023).

3. High-Voltage Contactors TDK [Электронный ресурс]. URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/hvc_presentation (дата обращения: 03.07.2023).

4. High voltage DC relay EVC250 [Электронный ресурс]. URL: <http://ebusbar.net/#/en-us/productdetails?id=629> (дата обращения: 03.07.2023).

5. Naka Y., Shiba Y., Sakurai Y. “SVE135” Sealed High-Voltage Contactor Having High Over-current Withstand Capability. *Fuji Electric Review*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 174–179. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fujielectric.com/company/tech/review_63-03.html (дата обращения: 03.07.2023).

6. Contactors for high-voltage electric vehicles – Littelfuse [Электронный ресурс]. URL: <https://m.littelfuse.com/media?resource-type=application-notes&itemid=c07c7e2e-6b21-4b60-bcb4-335022379b53&filename=contactor-application-note-for-high-voltage-electric-vehicles> (дата обращения: 03.07.2023).

Авторы:

Васильев Евгений Георгиевич, старший научный сотрудник АО «ВНИИР-Прогресс». В 2013 году окончил магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: veg@vniir.ru.

Иванов Иван Петрович, см. стр. 291.

Михайлов Алексей Валерьевич, см. стр. 291.

Филатов Артем Евгеньевич, начальник группы АО «ВНИИР-Прогресс». В 2015 году окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: afilatov@vniir.ru.

АНАЛИЗ ПРИЁМНЫХ АНТЕНН GPS/ГЛОНАСС ДЛЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Пестряев Д.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Шалимов А.С., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Проведен анализ приема сигналов точного времени со спутников GPS и ГЛОНАСС для различных типов антенн. Сравниваются данные уровней сигналов, получаемых со спутников (отношение сигнал/шум), на разном удалении от окна внутри помещения. Также сравниваются на осциллографе сигналы PPS от двух блоков РЕТ-ГЛОНАСС с испытываемыми антеннами по отношению к нормальному расположению антенны на улице.*

***Ключевые слова:** синхронизация, ГЛОНАСС, GPS, 1PPS, устройства РЗА.*

Система релейной защиты и автоматизации подстанции требует точной синхронизации времени для внутренних часов интеллектуальных электронных устройств. Согласно требованиям, точность синхронизации устройств не должна превышать 1 мкс [1].

В современном оборудовании для тестирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) необходима временная и/или межприборная синхронизация испытательных приборов, в том числе расположенных удалённо на одной или несколько подстанциях. Распространение получила синхронизация по выделенным каналам (1PPS, IRIG-B), локально-вычислительной сети (NTP, RTP) и непосредственно по спутниковым сигналам GPS/ГЛОНАСС. В последнем случае, возникает вопрос о качестве 1PPS сигнала на проверяемой подстанции в различных условиях размещения приёмной антенны при периодическом техническом обслуживании устройств РЗА. Была поставлена задача исследовать влияние уровня сигнала спутниковых антенн, размещённых внутри помещения на точность выходного синхросигнала 1PPS приёмного модуля. Так же требовалось найти зависимость уровня приема сигнала для антенн разной чувствительности.

Секция 3

Для этого были проведены испытания зависимости уровня сигнала от количества отслеживаемых спутников и ее временная погрешность на разных отдалениях антенн от окна. Сравнение уровней сигналов производилось в программно-техническом комплексе «ПроВерь РЗА» компьютерно-управляемых испытательных систем типа РЕТОМ-51/61/71, во встроенной утилите «GPS/ГЛОНАСС» и модуле временной синхронизации РЕТ-GPS/ГЛОНАСС [2]. Выполнялась оценка отклонения синхросигнала 1PPS испытываемых антенн относительно эталонной антенны, расположенной на улице.

Исследуемые образцы антенн GPS/ГЛОНАСС:

1. Антенна РЕТ - ГЛОНАСС 28dB;
2. Антенна Триада G2178 30dB;
3. Антенна Триада 2178 26dB;
4. Антенна TW7976 Dual-Band 32dB;
5. Антенна РСТЕЛ 40dB;
6. Антенна Bullet GPS 30dB.

В первом испытании произвели сравнение антенн в одинаковых условиях на уровень приема сигнала со спутников GPS и ГЛОНАСС для чистоты эксперимента. Антенны были расположены на расстоянии 40 см от окна с внешней стороны. Поясняющая схема приведена на рисунке.

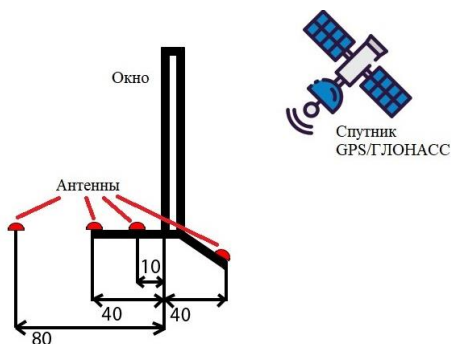


Схема расположения антенн по отношению к окну

В следующем испытании имитировалась реальная ситуация отсутствия возможности обеспечения открытого неба для антенны, при котором испытываемые антенны расположили в 10 см

Секция 3

от окна внутри помещения. Также было произведено сравнение этих испытаний.

Далее антенны перенесли на большее удаление, 40 и 80 см от окна, чтобы оценить уровень сигнала в помещении. В результате, была выполнена оценка состояния синхронизации ГНСС по выходу 1PPS приёмного модуля, результаты которой сведены в таблицу.

Таблица

Сводная таблица с результатами испытаний

Антенна	Отслеживаемые спутники (GPS / ГЛОНАСС) и временная погрешность			
	Расположение антенны			
	Улица, 40 см от окна	Помещение, расстояние от окна		
10 см		40 см	80 см	
PET-GPS28dB	6 / 6	5 / 3	4 / 2	0 / 0
	≈175 нс	≈175 нс	≈ 100 нс	≈ 999 нс
Триада G 2178 30dB	5 / 6	7 / 3	4 / 3	0 / 0
	≈25 нс	≈100 нс	≈ 50 нс	≈ 999 нс
Триада 2178 26dB	5 / 6	6 / 1	3 / 3	0 / 0
	≈25 нс	≈100 нс	≈ 50 нс	≈ 999 нс
TW7976 32dB	5 / 5	6 / 2	4 / 3	0 / 0
	≈125 нс	≈50 нс	≈ 175 нс	≈ 999 нс
PCTEL 40dB	6 / 6	7 / 4	4 / 3	1 / 0
	≈25 нс	≈25 нс	≈ 25 нс	≈ 999 нс
Bullet GPS 30 dB	6 / 0	6 / 0	4 / 0	0 / 0
	≈100 нс	≈100 нс	≈ 999 нс	≈ 999 нс

Из таблицы мы видим, что все антенны работают одинаково, находясь за окном. У каждой антенны есть определённые особенности приёма спутников ГЛОНАСС. Так, антенны PET-GPS 28 dB и TW7976 32 dB имеют большую временную погрешность для выхода 1PPS.

С антеннами в помещении, на расстоянии 10 и 40 см от окна, не возникают проблемы с синхронизацией. Уровень сигнала со спутников уменьшается, кроме антенны Bullet GPS, которая перестала синхронизироваться на расстоянии 40 см от окна.

При работе с антеннами внутри помещения на расстоянии 80 см от окна, теряется связь со всеми возможными спутниками и исключается использование антенны в утилите блока PЕT-GPS, кроме чувствительной антенны PCTEL 40 dB, но синхронизация микросекундной точности с одним спутником будет не стабильна.

Выводы

Все антенны работают одинаково, находясь за окном, у каждой антенны есть определённые особенности приёма спутников ГЛОНАСС. Испытания внутри помещения показали, что антенна, расположенная у окна в ряде случаев может быть использована для синхронизации испытательных приборов. Комплектная антенна блока PЕT-GPS (28dB) в практическом применении не проигрывает остальным модулям при работе внутри помещения. Использование более чувствительных и дорогостоящих антенн при их размещении внутри помещения, не даст гарантированного качественного увеличения эффективности синхронизации испытательных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сеитов П.В. Синхронизация времени на подстанциях: требования к точности, оценка влияния и методы контроля / П.В. Сеитов, Р.С. Плакидин. // ИСУП, 2019. № 5(83). – С. 29–31.
2. Универсальное программное обеспечение ПроВерь РЗА. Руководство пользователя. БРГА.71000-02 90. Редакция 23.12.22. Чебоксары, 2022.

Авторы:

Пестряев Денис Алексеевич, магистрант факультета энергетики и электротехники, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2022 год. E-mail: pestryaev.da@gmail.com.

Шалимов Александр Станиславович, см. стр. 55.

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УСТРОЙСТВ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ДО 630 А В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Викторова Т.В., Николаев В.А., Трофимов Е.Ю., Чернов Г.А., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия
Зайцев Ю.М., Петров В.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Проведен анализ конструкций и технических характеристик устройств дистанционного управления ведущих отечественных и зарубежных производителей. Предложена классификация устройств дистанционного управления автоматических выключателей. Выбран прототип разрабатываемого устройства и приведено его описание. Рассмотрен подход к разработке методики расчета основных узлов и деталей устройства дистанционного управления.*

***Ключевые слова:** автоматический выключатель, устройство дистанционного управления рукояткой, импортозамещение, электродвигательный привод, электромагнитный привод, храповой механизм, каретка, рукоятка автоматического выключателя.*

В настоящее время в электроэнергетических системах кораблей Российского военно-морского флота применяются автоматические выключатели (АВ) зарубежных фирм (Schneider Electric, АВВ и др.) с устройствами дистанционного управления (УДУ) рукояткой АВ, широко представленные на находящихся в строю кораблях. Отечественные низковольтные АВ категории качества «военная приемка (ВП)» в силу особенностей комплектации и технических характеристик не могут в полной мере заменить АВ иностранного производства в части комплектации УДУ.

Создание и внедрение отечественной серии УДУ АВ позволит:

- обеспечить возможность комплектования распределительных устройств (РУ) отечественными комплектующими категории качества «ВП»;
- существенно сократить зависимость от импортных комплектующих в РУ;
- повысить показатели надежность РУ;

Секция 3

- уменьшить расходы на эксплуатацию в связи с увеличением интервалов планового обслуживания РУ;
- обеспечить возможность полной автоматизации управления РУ.

Авторами проведен анализ конструкций следующих УДУ: электропривод ЭП-32/33, электропривод ЭП-35/37 (оба производства «ЛЕК»), электропривод А3724СМ №МООЕ777 производства ООО «НПП РИМК», электропривод CD/2-250, электропривод CD/2-630 (оба производства «ЕКФ»), моторный привод для ВА04-35Про, моторный привод для ВА50-39Про (оба производства АО «Контактор»), моторный привод Compact NSX 100/160, моторный привод Compact NSX 400/630 (оба производства Schneider Electric), моторный привод HXD042H производства Hager, моторный привод воздушного автоматического выключателя типа SACE Emax 1600A производства «ABB».

Проведенный анализ конструкций образцов УДУ, технических характеристик по каталогам, руководствам по эксплуатации, инструкциям по монтажу [1-13] позволил сделать классификацию рассматриваемых устройств по следующим признакам, которые отражены в таблице.

Таблица

Наименование признака классификации	Реализация признака
1. По способу сочленения УДУ с АВ	Встраиваемые Невстраиваемые
2. Вид преобразователя электрической энергии от источника питания в механическую энергию	Электродвигатель Электромагнит
3. Наличие редуктора	С редуктором Без редуктора
4. По преобразованию вращательного движения в возвратно-поступательное	Эксцентрик Кулачок
5. Наличие электронного блока	С электронным блоком Без электронного блока
6. По способу воздействия при помощи пружины на рукоятку при включении и отключении АВ	Пружина, действующая при включении АВ Пружина, действующая при отключении АВ

По предлагаемым признакам была выбрана конструкция электродвигательного привода HXD042H производства Hager в качестве прототипа разрабатываемого изделия. Описание принципа действия прототипа приводится ниже.

Электродвигательный привод имеет два режима работы: дистанционный и ручной. Его можно установить переключателем режима управления.

Для управления автоматическим выключателем в ручном режиме необходимо сдвинуть створку. Далее, рукояткой ручного управления вращательным движением через храповый механизм осуществляется включение автоматического выключателя и одновременно взведение пружины для последующего отключения. При нажатии на кнопку автоматический выключатель принимает положение «Отключено».

В дистанционном режиме управление автоматическим выключателем происходит кнопками дистанционного управления. При нажатии на кнопку дистанционного управления «Вкл» электродвигателем осуществляется включение автоматического выключателя и одновременно взведение пружины для последующего отключения автоматического выключателя. При нажатии на кнопку дистанционного управления «Откл» спусковой электромагнит освобождает защелку и предварительно взведенная пружина перемещает каретку, которая воздействует на рукоятку автоматического выключателя.

Проектирование приводных устройств следует начинать с расчета кинематической схемы привода. Исходными данными для расчета являются: номинальный вращающий момент на валу приводимого в движение устройства, его угловая скорость, график изменения нагрузки во времени, который определяется в результате анализа противодействующих характеристик при включении и отключении выключателя. По этим данным можно определить значения моментов и угловых скоростей. Определив предварительно требуемую номинальную мощность электродвигателя и угловую скорость его вала, вычисляют общее передаточное число редуктора привода. Оценивая полученное значение передаточного числа всего привода, намечают конкретные способы его реализации, иными словами, рассматривают

варианты компоновки приводного устройства, представляющего собой сочетание нескольких передач.

На основе такого предварительного расчета намечаются несколько способов реализации найденного передаточного числа и разрабатываются соответствующие кинематические схемы привода, рассматривая их на данном этапе в качестве предварительных, подлежащих уточнению в процессе дальнейшего проектирования.

Для выбора электродвигателя должны быть известны условия эксплуатации (график нагрузки, температура окружающей среды и др.). В соответствии с ними намечается по каталогу электродвигатель и проверяется на нагрев для установившегося и переходных режимов и на кратковременную нагрузку.

Ввиду того, что проектируемый электродвигательный привод предполагает кратковременный режим эксплуатации с повышенным пусковым моментом проверка на нагрев не требуется.

Определение каталожных характеристик для выбора электродвигателя проводят согласно формулам, приведенным в [14].

Далее, в соответствии с выбранным вариантом конструкции и типоразмера привода определяется необходимый крутящий момент на выходном колесе редуктора.

По полученному значению момента выбирается двигатель с учетом общего передаточного числа редуктора, которое возможно обеспечить в выбранном типоразмере привода.

Дальнейшее проектирование сводится к выбору количества ступеней редуктора и общего передаточного отношения, необходимого для достижения требуемых технических характеристик УДУ, в том числе габаритовесовых показателей.

Расчет деталей и узлов привода проводится по известным методикам, приведенным в [14-16].

Выводы

Рассмотрены вопросы проектирования устройств дистанционного управления автоматическими выключателями. Предложен подход к расчету его основных узлов и деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краткое руководство по эксплуатации ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭП-32/33 производства «ИЕС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

Секция 3

<https://cdn-01.iiek.ru/media/original/799a265e6d2d16eef7a94166b9b8c4b0910de5af3e9d9e9e4294ba13358d38c0.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

2. Краткое руководство по эксплуатации ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭП-35/37 производства «ЕЕС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn-01.iiek.ru/media/original/d3bb713d8fb73d30c0d9b20b618d6e170e1647bdd92038fbb4e8917fbd3c533a.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

3. Мастер-каталог продукции «ЕКФ» №32/1 [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://api.ekfgroup.com/storage/mc-32-1-2023.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

4. Технический каталог ВА04-31Про, ВА04-35Про АО «Контактор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/8c0/Catalogue_Va043xPro_05.2022.pdf (дата обращения: 01.11.2023).

5. Инструкция по монтажу дистанционного моторного привода к ВА04-35Про производства АО «Контактор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/d9e/7001230-33.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

6. Технический каталог ВА50-39Про АО «Контактор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/d00/ml117tnejtji3ynuuhabqf3bvz2o2wzc/catalogue_VA50-39Pro_New_NEW.pdf (дата обращения: 01.11.2023).

7. Инструкция по монтажу дистанционного моторного привода к ВА50-39Про производства АО «Контактор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/b32/%D0%9C%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4-%D0%98%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%B6%D1%83.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

8. Каталог автоматических выключателей и выключателей-разъединителей Compact NSX, NSXm на токи от 16 до 630А [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=LVPED221001EN.pdf&p_Doc_Ref=LVPED221001EN (дата обращения: 01.11.2023).

9. Руководство по эксплуатации автоматических выключателей и выключателей-разъединителей Compact NSX на токи от 100 до 630А [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=DOCA0140EN-N-03.pdf&p_Doc_Ref=DOCA0140EN (дата обращения: 01.11.2023).

10. Инструкция по монтажу моторного привода Compact NSX 100/160 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.se.com/us/en/product/LV429441/communicating-motor-mechanism-module-mtc-100-160-compact-nsx100-160-220-240vac-50-60hz/> (дата обращения: 01.11.2023).

11. Инструкция по монтажу моторного привода Compact NSX 400/630 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.se.com/eg/en/product/LV432646/standard-motor-mechanism-module-mt400-630-compact-nsx400-630-250-vdc/> (дата обращения: 01.11.2023).

12. Каталог Hager 2016-17 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://hager-shop.ru/HAGER_2016_2017.pdf (дата обращения: 01.11.2023).

13. Краткое руководство по эксплуатации моторного привода серии HXD042H производства «Hager» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hager.com/uk/products/h/hxd042h-motor-operator-h400-h630-100-240vac> (дата обращения: 01.11.2023).

14. Чернавский С.А. Проектирование механических передач. – М.: Машиностроение, 1976. – 608 с.

15. Курмаз Л.В. Детали машин. Проектирование: Справочное учебно-методическое пособие / Л.В. Курмаз, А.Т. Скойбеда. – 2-е изд., испр.: М.: Высш. Шк., 2005 – 309 с.: ил.

16. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя, том 3: Справочно-методическое пособие / В.И. Анурьев. – М: Машиностроение, 2001 – 864 с.

Авторы:

Викторова Татьяна Владимировна, инженер-конструктор 3 категории отдела автоматических выключателей АО «ВНИИР-Прогресс». В 2023 году окончила факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: tvviktorova@vniir.ru.

Зайцев Юрий Михайлович, см. стр. 265.

Николаев Владислав Александрович, заместитель начальника отдела автоматических выключателей – начальник лаборатории АО «ВНИИР-Прогресс». В 2014 году окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: vnikolaev@vniir.ru.

Петров Виктор Николаевич, см. стр. 272.

Трофимов Евгений Юрьевич, начальник отдела автоматических выключателей АО «ВНИИР-Прогресс». В 2000 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: etrofimov@vniir.ru.

Чернов Геннадий Андреевич, инженер-конструктор 3 категории отдела автоматических выключателей АО «ВНИИР-Прогресс». В 2023 году окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: gachernov@vniir.ru.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ КАРЬЕРНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Малафеев С.И., ООО Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Россия

Малафеева А.А., Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Владимирский филиал, г. Владимир, Россия

***Аннотация.** Представлен анализ локальной системы электропитания горных машин. Выполнен анализ современных технических решений по развитию микросетей на горных предприятиях. Рассмотрены особенности электроснабжения карьерных экскаваторов и способы повышения энергетической эффективности. Приведено описание функциональной схемы микросети, обеспечивающей эффективную работу карьерных экскаваторов.*

***Ключевые слова:** энергия, электрооборудование, электрическая сеть, экскаватор, управление, гибридная микросеть, дизель-генераторная станция, аккумулятор, распределенная генерация.*

Введение

На карьерах в настоящее время для электропитания электрических и электрогидравлических машин: экскаваторов, буровых станков и другого оборудования, используются энергетические системы с традиционной генерацией электроэнергии [1 - 2]. Стационарные и передвижные электрические сети предприятий являются приоритетным компонентом добывающих комплексов. Во многих случаях, например, при разработке новых месторождений, на предприятиях, не оснащенных линиями электроснабжения, и др., требуется автономная работа машин. Альтернативой дизельным гидравлическим экскаваторам и буровым станкам является применение машин с электрическим приво-

дом, получающим электропитание от автономных источников электрической энергии. В связи с этим большой научный и практический интерес представляют разработка и исследование технических решений для организации локальных систем электроснабжения: от гибридных машин [3] и накопителей рекуперируемой энергии [4] до микросетей с использованием возобновляемых источников энергии [5, 6]. Оптимальная работа гибридной микросети требует сложной стратегии управления энергопотреблением, обеспечивающей взаимодействие различных источников энергии и нагрузок [7].

В настоящей статье приведены результаты исследований особенностей электроэнергетических процессов при работе карьерных электрических экскаваторов и перспектив применения микросетей для горной промышленности, выполненных в Компании «Объединенная Энергия», г. Москва.

Современные тенденции развития технологии микросетей в горной промышленности

В соответствии с концепцией Консорциума США по технологическим решениям в области надежности электроснабжения (CERTS) микросети – это системы распределения электроэнергии, содержащие нагрузки и распределенные энергетические ресурсы (такие как распределенные генераторы, устройства хранения или управляемые нагрузки), которые могут работать контролируемым и скоординированным образом, либо при подключении к основной энергосети, и/или функционируя автономно [8]. Микросеть представляет собой гибкую и управляемую систему, способную работать как в режиме подключения к сети, так и в автономном режиме. Для этого требуется интеллектуальный механизм управления, позволяющий сбалансировать производство и потребление энергии, гарантируя при этом стабильное и надежное электроснабжение [7]. Конфигурация микросети может быть переменного, постоянного или гибридного типа [5, 8, 9].

Микросеть в общем случае – это локализованная энергетическая система, которая объединяет различные распределенные энергетические ресурсы, включая традиционные генераторы, возобновляемые источники, такие как солнечные фотоэлектри-

ческие системы, ветряные турбины, а также системы хранения энергии и интеллектуальные средства управления [4, 5, 8]. Эта динамическая комбинация образует так называемую гибридную возобновляемую микросетевую систему, способную эффективно управлять производством, потреблением и хранением энергии.

Главной мотивацией, лежащей в основе использования микросетей для горных предприятий, является увеличение эффективности использования энергетических ресурсов путем объединения различных технологий и источников для удовлетворения энергетических потребностей, energy service demands. повышения энергетической независимости и обеспечения устойчивости энергосистемы.

Электроэнергетические процессы при работе карьерных экскаваторов

Работа мехатронного комплекса одноковшового экскаватора, содержащего три основных привода главного движения – подъема, напора (тяги) и поворота, имеет циклический характер. В течение цикла продолжительностью 25...60 с происходит потребление энергии из сети и её преобразование в механическую работу, изменение кинетической и потенциальной энергий механических масс, механо-электрическое преобразование кинетической энергии движущихся масс (при торможении платформы и опускании ковша) и активного действия горной породы, рекуперация электрической энергии в питающую сеть и диссипация энергии в электрических и механических элементах мехатронной системы и питающей сети. На рис. 1 показана экспериментальная осциллограмма активной мощности, потребляемой карьерным экскаватором ЭКГ-20 [10]. Процесс зарегистрирован на вводе высоковольтной ячейки экскаватора.

При выполнении экскаватором механической работы происходит многократное преобразование энергии и изменение ее параметров. Особенность мехатронного комплекса экскаватора – его активное взаимодействие с питающей электрической сетью [11]. Характер этого взаимодействия зависит от структуры и компонентов мехатронной системы, а также от параметров питающей электрической сети и характеристик электротехнических устройств, работающих в этой сети.

При высокودинамичном циклическом режиме работы при чередовании потребления и рекуперации энергии и большой единичной потребляемой мощности экскаватора важным компонентом микросети должен быть накопитель энергии, обеспечивающий накопление рекуперированной энергии и поддержание пиковых нагрузок и, таким образом, «выравнивание» графика нагрузки источников.

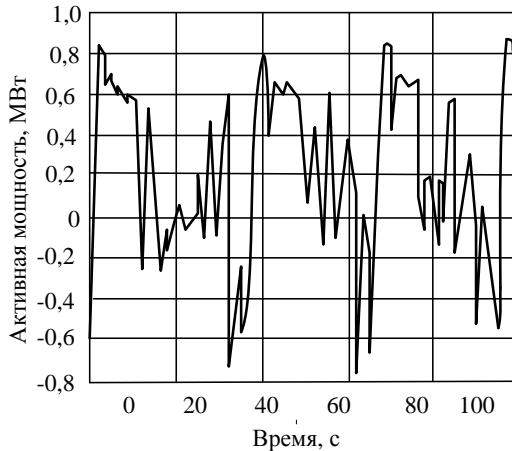


Рис. 1. Оциллограмма активной мощности, потребляемой экскаватором

Микросети для электроснабжения карьерных машин

Микросеть для горных предприятий – это малая или средняя распределительная система, включающая один или несколько источников электроэнергии, накопитель энергии, средства управления и защиты и интеллектуальную инфраструктуру для организации взаимодействия потребителя с источниками и накопителем. Традиционные автономные источники – это дизель-генераторные станции [12]. В качестве других источников энергии могут быть самые разные варианты и технологии, использующие энергию солнца и ветра, природный газ, биогаз и др. [5, 6]. Основные средства накопления и хранения энергии: механические маховиковые устройства, электрические аккумуляторы и суперконденсаторы.

На рис. 2 показан вариант простой структуры микросети для участка добычи полезных ископаемых. Она содержит дизель-генераторную станцию, накопитель, коммутационную аппаратуру для подключения к стационарной или передвижной линии электропередачи, локальные контроллеры и центр управления электропотреблением, который контролирует электроэнергетические процессы и обеспечивает удаленный мониторинг.

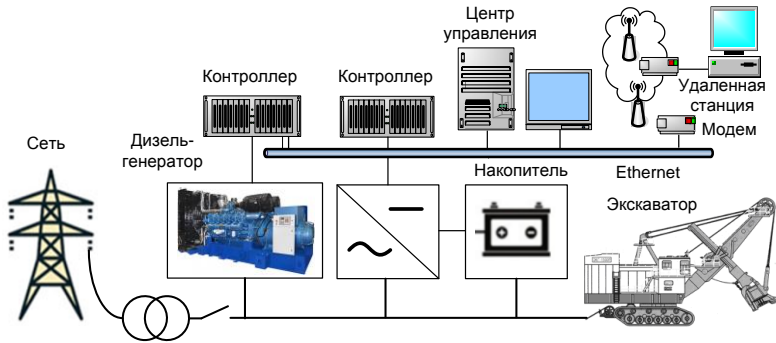


Рис. 2. Упрощенная схема микросети

Для горных предприятий особый интерес представляют мобильные микросети для перегона экскаваторов и буровых станков [12]. Такая микросеть (перегонная станция) содержит простой набор основных компонентов: дизельный двигатель; генератор; высоковольтную ячейку и устройства защиты, размещенные на автомобиле КАМАЗ. Станция подключается к экскаватору с помощью штатного кабеля. При подключении возможна работа всех приводов главного движения. Мобильная микросеть обеспечивает перегон всех экскаваторов и буровых станков с различными типами приводных двигателей хода постоянного и переменного тока. Станция может быть использована при ремонтах и пуско-наладочных работах в карьере при отсутствии или аварийном отключении питающей линии. Несколько станций могут быть объединены в сеть и обеспечивать электропитание участка карьера. Станция также может работать параллельно с сетью и обеспечивать снижение максимумов нагрузки.

Разработанные Компанией «Объединенная Энергия» высоковольтные автономные перегонные станции [12] в настоящее

время успешно эксплуатируются на добывающих предприятиях России и Казахстана.

Заключение

Микросети с накопителями энергии для горных предприятий обеспечивают новые возможности организации работ и повышение эффективности использования энергетических ресурсов. При этом возрастают функции преобразования, контроля и управления в локальной сети. Для полной реализации потенциала гибридных микросетей с накопителями энергии необходимы дальнейшие исследования, разработки и внедрение. В тематике исследований могут быть совершенствование технологий накопления и хранения энергии, увеличение надёжности и долговечности оборудования, обеспечение качества электроэнергии и электробезопасности. Необходимы руководящие документы, регламентирующие применение микросетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чулков Н.Н. Электрификация карьеров. – М., Недра, 1974. – 344 с.
2. Morley L.A. Mine Power Systems. Information Circular 9258 (United States Bureau of Mines). 1991: 437 p.
3. P&H 2650 CX Hybrid Shovel. Joy Global, 2016. - 7 p.
4. Kolner W. Peak Shaver/Rate Rise Limiter for Electric Rope Shovels and Draglines / W. Kolner, and G. Madhavarao. – June 13, 2013, MEMSA Annual Meeting, Clearwater, Fl. 2013. – 24 p.
5. Anvari-Moghaddam A. Microgrids. Advances in Operation, Control, and Protection / A. Anvari-Moghaddam, H. Abdi, B. Mohammadi-Ivatloo, and N. Hatziargyriou (Editors). – Springer Nature Switzerland AG, 2021, 642 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>.
6. Carvalho M. Optimal synthesis of energy supply systems for remote open pit mines / M. Carvalho, A. Romero, C. Shieds, and D.L. Millar. – Applied Thermal Engineering, 64, 2014, pp. 315–330, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.040>.
7. Ndeke C. Energy Management Strategy for a Hybrid MicroGrid System Using Renewable Energy / C. Ndeke, M. Adonis, A. Almakto. - Posted Date: October 30th, 2023, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3453430/v1>.
8. Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and control. John Wiley & Sons, 2014, 340 p.

9. *Jahromi M.G.* Powering mobile mining machines / M.G. Jahromi, G. Mirzaeva, S.D. Mitchell, and D. Gay. - *EEE Industry Applications Magazine* Sept/Oct 2016, pp. 1-11, www.IEEE.org/ias.

10. *Malafeev S.I.* Investigation of electric power processes during the operation of a mining excavator. Published in: 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) / S.I. Malafeev, S.S. Malafeev. – Date of Conference: 25–29 March 2019, DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743002.

11. *Малафеев С.И.* К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 126-137. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

12. *Malafeev S.I.* Analysis of a quarry mobile diesel generator station during the moving of an excavator / S.I. Malafeev, S.S. Malafeev. - In book: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Lecture Notes in Mechanical Engineering*, A.A. Radionov and V.R. Gasiyarov (eds.), Vol. II, 2021, pp. 803 – 810. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_93.

Авторы:

Малафеев Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник компании «Объединенная Энергия». Окончил в 1975 году приборостроительный факультет Владимирского политехнического института. Защитил диссертацию «Управление в мехатронных системах по критерию эффективного использования энергетических ресурсов» в 2002 году в МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: simalafeev@gmail.com.

Малафеева Алевтина Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Владимирский филиал. Окончила в 1980 году приборостроительный факультет Владимирского политехнического института. Защитила диссертацию «Моделирование процессов управления в сложных системах с эволюцией: геометрический подход» в 1999 году в МГАТУ им. К.Э. Циолковского. E-mail: amalafeeva@rambler.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Григорьев В.Г., Храмов Л.Д., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Борисов Л.Ф. АО «ВНИИР-Прогресс» г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В настоящее время различными предприятиями выпускается широкая номенклатура устройств дуговой защиты комплектных распределительных устройств высоковольтных сетей 6-35 кВ. Увеличение мощностей низковольтных электрических сетей постоянного тока автономных технических систем ставит задачу применения в них устройств дуговой защиты для предотвращения крупных аварий. Выполнен анализ экспериментально полученных электрических параметров электрической дуги в низковольтной цепи постоянного тока с целью оценки возможности их использования в качестве контролируемых параметров устройства дуговой защиты.*

***Ключевые слова:** устройство дуговой защиты, параметры электрической дуги, амплитудный спектр, функциональная надежность.*

В настоящее время для защиты от опасных последствий дуговых замыканий между токоведущими элементами комплексных распределительных устройств переменного тока высоковольтных электрических сетей выпускается десятки типов устройств дуговой защиты (УДЗ). Производителями этих устройств являются АО «ЧЭАЗ», ООО «Релематика», ООО НПП «Прозэл», АО «Промэлектроника», АО «РАДИУС Автоматика», ООО «Юнител Инжиниринг» и другие.

Увеличение мощностей низковольтных электрических сетей постоянного тока автономных технических систем ставит задачу применения в них устройств дуговой защиты для предотвращения крупных аварий [1].

В современных УДЗ факт появления электрической дуги устанавливается применением оптоэлектронных и волоконно-оптических датчиков. Для исключения ложных срабатываний от действия световых помех реализация логики функционирования УДЗ осуществляется с использованием также выходных сигналов пусковых органов защит минимального напряжения и мак-

симально-токовых защит [2]. В низковольтных электрических сетях постоянного тока токоограничивающий эффект электрической дуги может создать режим работы сети, когда не происходит срабатывание пусковых органов по току и напряжению устройств релейной защиты [3].

В связи с этим в этих случаях для обеспечения надежности функционирования УДЗ необходимо использовать другие параметры режима работы электрической сети при возникновении дугового режима короткого замыкания в распределительных устройствах [4].

Горение дуги сопровождается взаимосвязанными сложным образом термическими, газодинамическими и электродинамическими процессами. Поэтому дуговой процесс сопровождается меняющимися случайно световыми и электрическими параметрами. На характер их изменений влияют множества факторов, определяющих дуговой процесс. Основными факторами являются номинальное напряжение сети, параметры элементов сети, величина дугового промежутка, а также состояние поверхностей электродов, на которых находятся опорные точки дуги. Решение задачи теоретического описания этих процессов затруднительно [5].

В данной работе приведены результаты анализа спектральных составов напряжения и тока дуги по экспериментальным данным. Схема проведения исследований представляет собой соединенные последовательно генератор постоянного тока, токоограничивающий резистор и дуговой промежуток. Дуга создавалась путем пережигания проволочной перемычки между электродами [6].

Номинальное напряжение на выходе генератора составляло 320 В. Максимальное возможное значение тока равнялось 8 кА. Для получения осциллограммы тока использовался измерительный шунт.

Осциллографирование проводилось с использованием многоканального регистратора процессов коммутации (далее – МРПК, регистратор). МРПК представляет собой комплекс приборов, устройств и управляющих программ. Он предназначен для работы совместно со стендом коммутационных испытаний, сбора сведений о коммутационных процессах в низковольтных

Секция 3

электрических аппаратах при их испытаниях, предварительной обработки полученных данных. Регистратор позволяет одновременно регистрировать мгновенные значения токов и напряжений, представлять их на ПЭВМ в графическом и табличном виде.

На рис.1 и рис. 2 показаны соответственно осциллограммы тока дуги и напряжения на дуге при расстоянии между токоведущими шинами 20 мм . Общая длительность дугового процесса составляет 150 мс. Наибольшее мгновенное значения тока дуги на осциллограмме равно 3915 А. Наименьшее мгновенное значение напряжения на дуге составляет 180 В.

Процесс горения дуги состоит из этапа формирования процесса дугового разряда и этапа стабилизации режима горения дуги.

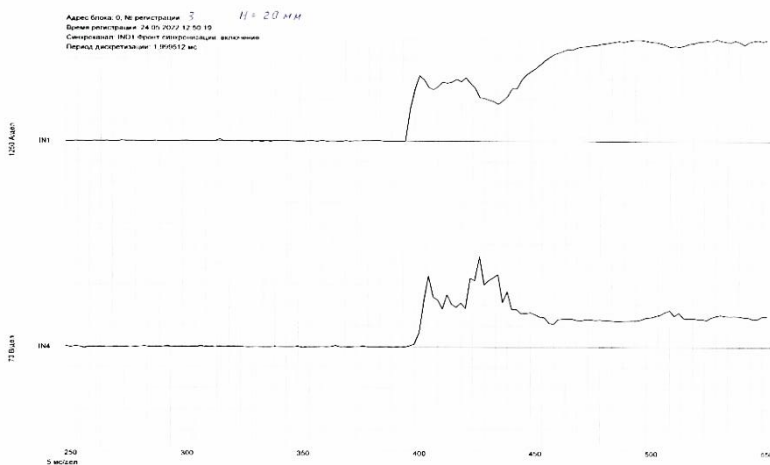


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения на дуге при расстоянии между шинами 20 мм

На первом этапе происходит разогрев электродов и развитие ионизационного процесса воздуха. Этот процесс сопровождается динамичным изменением напряжения и тока дуги и длится в течение 50 мс. Затем на этапе стабилизации режима горения дуги колебания тока и напряжения происходят в небольших пределах. Для оценки количественных параметров ко-

лебаний напряжения и тока дуги был проведен их спектральный анализ.

Программа вычисления амплитудно-частотных спектров тока и напряжения реализована в среде графического программирования NI LabVIEW с использованием штатных подпрограмм. Блок-схема программы показана на рис.2.

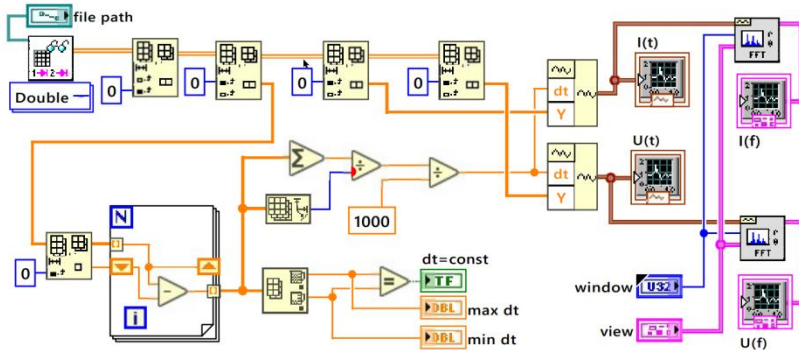


Рис. 2. Блок-схема программы вычисления спектров тока и напряжения

Входные данные считываются подпрограммой «Read Delimited Spreadsheet.vi» из файла, путь и имя которого задаются в органе управления «file path». Файл данных должен содержать последовательности моментов времени дискретизации t_n (мс), дискретных отсчетов тока i_n (А) и дискретных отсчетов напряжения u_n (В), где $n = \overline{1, N}$ – номер отсчета, N – число дискретных отсчетов анализируемых реализаций. Каждая из последовательностей должна быть записана в виде одной строки, в которой элементы представлены в ASCII-кодах и разделены знаками табуляции. Первый столбец файла не учитывается при вычислениях, в нем может содержаться справочная информация, например, названия строк.

В программе предусмотрен контроль целостности дискретных последовательностей путем проверки постоянства интервалов дискретизации, т.е. условия

$$\Delta t_n \equiv t_{n+1} - t_n = \text{const}, \quad n = \overline{1, N-1}.$$

Результат проверки данного условия отображается на бинарном индикаторе «dt=const».

Секция 3

Для вычисления амплитудно-частотных спектров тока и напряжения в программе дважды использована штатная подпрограмма «FFT Spectrum (Mag-Phase).vi», в которой реализован известный алгоритм дискретного преобразования Фурье. Последовательность дискретных отсчетов тока или напряжения, поступающая на вход подпрограммы «FFT Spectrum (Mag-Phase).vi» представляется в формате «Waveform», который кроме значений дискретных отсчетов анализируемой величины содержит значение интервала дискретизации. Результат работы подпрограммы представляется в формате «waveform» и содержит последовательность дискретных значений частотного спектра, а также шаг по частоте.

На вход подпрограммы «FFT Spectrum (Mag-Phase).vi» также поступают дополнительные данные: тип сглаживающего окна, устанавливаемый в меню «window» и формат представления вычисленного спектра, задаваемый органом управления «view». Вычисленные спектры тока и напряжения отображаются графически на индикаторах «I(f)» и «U(f)».

Результаты проведенного анализа приведены на рис. 3 и 4 в виде графиков, где по горизонтальной оси отложены значения частот гармоник спектра в Гц, а по вертикальной оси – значения их амплитуд в амперах.

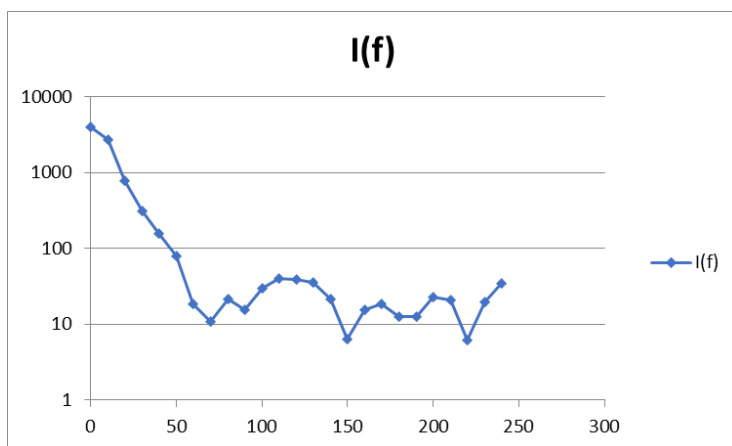


Рис. 3. Амплитудно-частотный спектр тока дуги

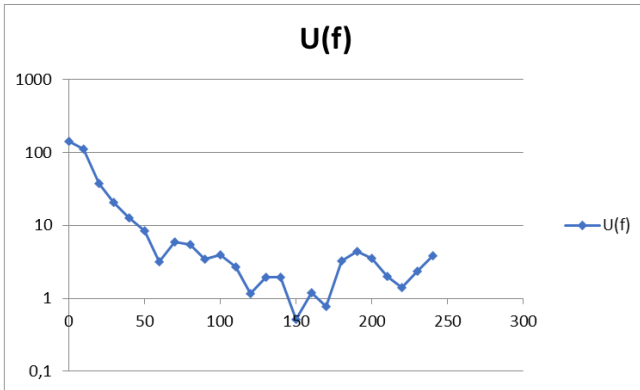


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр напряжения дуги

Выводы

Из полученных результатов проведенных исследований следует, что амплитуды гармоник напряжения и тока дуги быстро спадают по мере увеличения их частоты до 50 Гц. При более высоких частотах значения амплитуд гармоник находятся вблизи уровня, который на порядок ниже уровня, соответствующего частоте 50 Гц.

При выборе гармонических составляющих спектров напряжения тока дуги в качестве контролируемых параметров необходимо учитывать как уровни их амплитуд, так и значения их частот, определяющих быстроту их идентификации с учетом параметров применяемого частотного фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азовцев А.А.* Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока / Азовцев А.А., Рокотян Ю.В. / В сб. «Судовая электротехника и связь», вып.40, 1968.
2. *Нагай В.И.* Определение чувствительности опτικο-электрических защит от дуговых коротких замыканий в комплектных распределительных устройствах напряжением 6-10 кВ. / Нагай В.И., Сарры С.В. / Изв. вузов. Электромеханика. – №1, 1999. – .48–51с.
3. *Гольцман Э.Р.* Токоограничение при дуговых коротких замыканиях / Гольцман Э.Р. / В сб. «ЭП, Аппараты низкого напряжения». М. вып. 7. 1971.

4. Григорьев В.Г. Модель надежности устройств релейной защиты и автоматики со встроенным средством технического диагностирования / Григорьев В.Г., Павлова Н.В. / Международный научно-исследовательский журнал «Успехи современной науки и образования» № 12, том 5, 2016 г. – 123–126 с.

5. Брон О.Б. Продольные потоки плазмы в дуге при перегрузках и коротких замыканиях. / Брон О.Б., Сушков Л.К. / «Вестник Харьковского политехнического института», № 19(67), вып. 2, 1967.

6. Григорьев В.Г. Исследование характеристик открытой электрической дуги в низковольтной цепи постоянного тока / Григорьев В.Г., Борисов Л.Ф. / Материалы III Международной научно-практической конференции «Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России», 2023 г. – 297–301 с.

Авторы:

Григорьев Валентин Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. В 1972 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета. В 1984 году получил ученую степень по теме «Методы и средства технического диагностирования полупроводниковых устройств релейной защиты сетей 6-10 кВ». E-mail: gr-valentin@mail.ru.

Борисов Леонид Филиппович, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник АО «ВНИИР-Прогресс». В 1972 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета. В 1991 году получил ученую степень по теме «Комплексная защита генераторов автономных энергосистем с самоконтролем исправности». E-mail: borisov@vniirl.ru.

Храмов Лев Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и радиотехнических систем, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. В 1993 году окончил радиотехнический факультет Казанского авиационного института. В 2000 году получил ученую степень по теме «Распределенные электродиффузионные датчики и методы измерения гидродинамических полей». E-mail: hl@mail.ru.

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Гурьев В.К., Котик В.Ю., Руссова Н.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

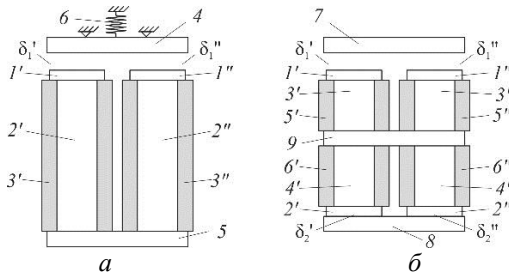
Аннотация. Рассмотрены конструктивные исполнения поляризованных электромагнитов с возможностью совместного использования в них как сил притяжения, так и отталкивания с помощью постоянных магнитов.

Ключевые слова: поляризованный электромагнит, постоянный магнит, силы отталкивания и притяжения.

Необходимость создания энергоэффективных электромагнитов для применения в качестве приводов электрических аппаратов представляет актуальную задачу. В коммутационных устройствах наибольшее распространение в качестве приводного механизма получили электромагниты, состоящие, как правило, из неподвижной (сердечник, ярмо) и подвижной (якорь) частей магнитопровода с расположенной на нём одной или более обмотками. Среди них одними из перспективных считаются поляризованные электромагниты или электромагниты с магнитной защёлкой (памятью), обладающие лучшими параметрами по быстродействию, массогабаритным показателям и энергосбережению, используемые, например, в вакуумных выключателях, контакторах, реле, в которых постоянный магнит служит для удержания якоря в замкнутом положении либо совместно со включающей обмоткой, либо после её обесточивания. В последнем случае отключение привода осуществляется подачей питания на обмотку обратной полярности или на отключающую обмотку.

В конструкции поляризованного электромагнита (рисунок *a*) магнитные потоки обмоток $3'$ и $3''$, постоянных магнитов $1'$ и $1''$ последовательно проходят по магнитопроводящему контуру через постоянный магнит $1'$, якорь 4 , постоянный магнит $1''$, сердечник $2''$, ярмо – 5 и сердечник $2'$.

Секция 3



Электромагниты с постоянными магнитами:

а – 1' и 1'' – постоянные магниты; 2' и 2'' – сердечники;

3' и 3'' – обмотки; 4 – яркорь; 5 – ярмо; 6 – возвратная пружина;

δ_1' и δ_1'' – рабочие зазоры; *б* – 1' и 1'', 2' и 2'' – постоянные магниты;

3' и 3'', 4' и 4'' – сердечники; 5' и 5'', 6' и 6'' – обмотки; 7 и 8 – яркоря;

9 – ярмо; δ_1' и δ_1'' , δ_2' и δ_2'' – рабочие зазоры

При совпадении направлений этих потоков яркорь 4 при расположении постоянных магнитов на торцах сердечников или на яркоре (не показано) притягивается (знак плюс) и общая электромагнитная сила притяжения (для упрощения потоки выпучивания, рассеяния и насыщение стали не учитываются) [1]:

$$P_{\Sigma} = \frac{(F_n \pm F_p)^2}{2\mu_0 S R_{\delta}} - P_B,$$

где F_n – МДС постоянных магнитов 1' и 1''; F_p – МДС рабочих обмоток 3' и 3''; μ_0 – магнитная постоянная; S – площадь поперечного сечения полюса; R_{δ_1} – магнитное сопротивление рабочих зазоров δ_1' и δ_1'' ; P_B – механическая сила возвратной пружины.

В случае встречных поляризующих и рабочих потоков возможны два варианта размыкания яркоря:

постоянные магниты расположены на полюсах сердечников и результирующая электромагнитная сила соответствует разности МДС постоянных магнитов и рабочих обмоток (знак минус), яркорь при этом размыкается под действием возвратной пружины;

постоянные магниты расположены на яркоре и результирующая электромагнитная сила соответствует сумме МДС постоянных магнитов и рабочих обмоток (знак плюс), яркорь при этом размыкается под действием электромагнитной силы отталкивания и противодействующей силы возвратной пружины.

Поляризованный электромагнит на рисунке *б* отличается тем, что состоит из двух, аналогичных представленному на рисунке *а*, электромагнитов без возвратной пружины, имеющих общее ярмо 9, два связанных между собой якоря 7 и 8 со своими независимыми магнитопроводящими контурами: постоянный магнит $1'$ – якорь 7 – постоянный магнит $1''$ – сердечник $3''$ – ярмо 9 – сердечник $3'$; постоянный магнит $2'$ – якорь 8 – постоянный магнит $2''$ – сердечник $4''$ – ярмо 9 – сердечник $4'$.

Для перемещения якорей 7 на замыкание и 8 на размыкание в первом контуре обмотками $5'$ и $5''$ создаются рабочие потоки однонаправленные с поляризующими потоками постоянных магнитов $1'$ и $1''$, во втором контуре обмотками $6'$ и $6''$ создаются рабочие потоки, встречно направленные поляризующим потокам постоянных магнитов $2'$ и $2''$. Результирующая электромагнитная сила в случае расположения постоянных магнитов $1'$ и $1''$, $2'$ и $2''$ соответственно на торцах сердечников $3'$ и $3''$, $4'$ и $4''$

$$P_{\Sigma} = \frac{(F_{п1} + F_{п1'})^2}{2\mu_0 S_1 R_{\delta 1}^2} + \frac{(F_{п2} - F_{п2'})^2}{2\mu_0 S_2 R_{\delta 2}^2}$$

или на якорях 7 и 8

$$P_{\Sigma} = \frac{(F_{п1} + F_{п1'})^2}{2\mu_0 S_1 R_{\delta 1}^2} + \frac{(F_{п2} + F_{п2'})^2}{2\mu_0 S_2 R_{\delta 2}^2},$$

где $F_{п1}$ и $F_{п2}$ – МДС постоянных магнитов $1'$, $1''$ и $2'$, $2''$; $F_{п1'}$ и $F_{п2'}$ – МДС рабочих обмоток $5'$, $5''$ и $6'$, $6''$; S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения полюсов сердечников $3'$, $3''$ и $4'$, $4''$; $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ – магнитные сопротивления рабочих зазоров δ_1' , δ_1'' и δ_2' , δ_2'' . То есть в последнем случае происходит одновременное притяжение разомкнутого якоря к полюсам сердечников первого контура и отталкивание замкнутого якоря от полюсов сердечников второго контура. При питании обмоток противоположной полярности силы притяжения и отталкивания якорей меняются местами.

Выводы

Использование силы отталкивания между электромагнитом и постоянным магнитом даёт возможность повысить чувствительность и электромагнитную силу приводов и, соответственно, увеличить коммутируемую мощность при сохранении или уменьшении их массы и объёма [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов по спец. «Электрические аппараты» / И. С. Таев, Б. К. Буль, А. Г. Годжелло и др. Под ред. И. С. Таева. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.: ил.

2. *Иванов И. П.* Вопросы общей теории и практики проектирования поляризованных электромагнитов / И. П. Иванов, Е. В. Сагарадзе, Г. П. Свинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 44-50. – DOI 10.17213/0136-3360-2017-2-44-50. – EDN YJVUHN.

Авторы:

Гурьев Виктор Константинович, аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1989 году. E-mail: vkgur14@list.ru.

Котик Валентин Юрьевич, аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил факультет энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» в 2022 году. E-mail: kotikvalentin@mail.ru.

Руссова Наталия Валерьевна, см. стр. 272.

РЕЛЕ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Романова Е.С., Петров О.А., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия

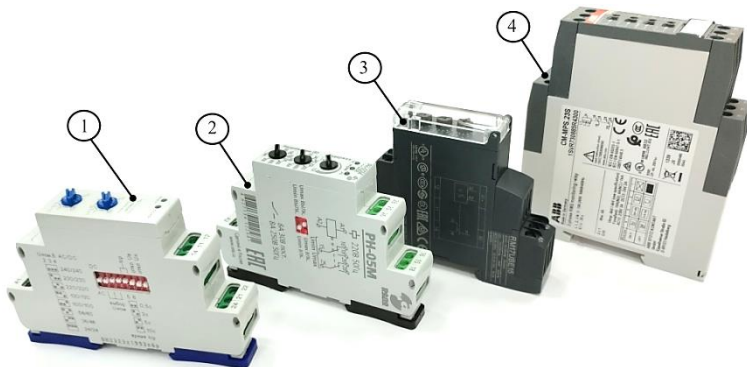
Руссова Н.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Приведен обзор российских и зарубежных реле контроля напряжения. Выявлены их основные достоинства и недостатки. Обоснована необходимость разработки новой серии реле контроля параметров электрической сети с улучшенными техническими параметрами, удовлетворяющими современным требованиям к компонентной базе.

Ключевые слова: реле контроля напряжения, параметры, характеристики, испытания.

Реле контроля напряжения (РКН) предназначены для контроля повышенного и пониженного напряжения, пропадания или обрыва фазы в системах автоматического управления и защиты. Повышенное напряжение увеличивает тепловыделение в защищаемом устройстве, что ведёт к его неисправности или разрушению. Снижение напряжения питания ниже допустимого уровня, как правило, создаёт риск перехода коммутационных элементов защищаемого устройства в неопределённое состояние с нарушением нормального режима работы. Пропадание или потеря фазы обычно приводит к неисправности подключаемого в качестве нагрузки устройства (например, электродвигателя).

В настоящее время на рынке предлагаются десятки серий однофазных и трехфазных РКН различных зарубежных и отечественных фирм, например реле контроля напряжения RM17UBE15 (Schneider Electric, Франция) [1]; многофункциональное реле контроля фаз CM-MPS.23S (ABB, Швеция/Швейцария) [2]; реле контроля фаз CM-MPS.23S (ABB, Швеция/Швейцария) [2]; реле контроля напряжения РКН-1-1-15М (Меандр, Россия) [3]; реле напряжения РН-05М (Реле и автоматика, Россия) [4] и др. Внешний вид реле представлен на рисунке.



Реле контроля напряжения:

1 – Меандр (Россия); 2 – Реле и автоматика (Россия); 3 – Schneider Electric (Франция); 4 – ABB (Швеция/Швейцария).

Секция 3

На основе сравнения характеристик существующих РКН можно сделать следующие выводы:

- технические характеристики рассматриваемых реле во многом схожи;
- стандартным исполнением реле является реле в пластмассовом корпусе с креплением на монтажную DIN-рейку 35 мм;
- многие реле имеют световую индикацию, реже цифровой дисплей;
- пороги срабатывания по напряжению, времена задержек и другие параметры могут быть фиксированными или задаваться пользователем при помощи переключателей на лицевой панели (DIP, поворотных или вводом в интерактивном режиме);
- выходом реле, не имеющего встроенного силового коммутирующего органа, как правило является контакт электромагнитного реле, реже выход бесконтактный (транзисторный или симисторный);
- подавляющую долю рынка составляют микропроцессорные реле, реже – аналоговые.

Для проверки работы РКН была разработана программа методика, в которую входили проверки основных параметров реле, таких как проверка порогов срабатывания по максимальному и минимальному напряжениям, проверка времен задержки срабатывания и повторного включения, проверка потребляемой мощности, проверка работоспособности при крайних значениях рабочих температур и др.

Результаты испытаний показали, что технические характеристики РКН некоторых фирм не соответствуют заявленным в каталожной информации.

Анализ показал, что существующие РКН не отвечают современным требованиям комплекса государственных военных стандартов «Климат-8» по диапазону рабочих температур, стойкости к механическим воздействиям, сроку службы, и т.п.

В связи с этим имеется необходимость в разработке и освоении промышленного производства новой серии реле контроля параметров электрической сети (реле напряжения) с улучшенными техническими параметрами, удовлетворяющими современным требованиям к компонентной базе. В отличие от анало-

гов новая серия реле должна иметь расширенные функциональные возможности, повышенное удобство в эксплуатации, увеличенную коммутационную способность, уменьшенные габариты и массу, повышенную надежность, срок службы и соответствовать требованиям комплекса государственных военных стандартов «Климат-8».

Работа выполнена в рамках гранта «исследование и проектирование реле контроля напряжения унифицированной серии» фонда содействия инновациям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zelio Control – модульные реле измерения и контроля. Реле контроля однофазного питания и напряжения постоянного тока RM17 UAS и RM17 UBE // Каталог фирмы «Schneider Electric» URL: http://www.shop.schneider-spb.ru/UserFiles/Zelio_Control_Rele_kontrolya_odnofaznogo_pitaniya_i_napryazheniya_postoyannogo_toka_RM17_UAS_i_RM17_UBE.pdf (дата обращения: 27.10.2023).

2. Трёхфазные реле контроля CM-MPS.x3 и CM-MPN.x2 / Каталог фирмы «ABB», 2022.

3. Каталог продукции: каталог / ЗАО «Меандр» - СПб., 2023. – 200 с. – С. 40.

4. Реле контроля трехфазного напряжения ЕЛ-11М, ЕЛ-12М, ЕЛ-13М: инструкция по эксплуатации: разработчик и изготовитель ООО «Реле и автоматика». – М., 2021. – 2 л.

Авторы:

Романова Евгения Сергеевна, старший научный сотрудник АО «ВНИИР-Прогресс». В 2012 году окончила магистратуру факультета радиотехники и электроники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: romanovaes@vniir.ru.

Петров Олег Александрович, начальник отдела 2 АО «ВНИИР-Прогресс». В 1997 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: petrov06@vniir.ru.

Руссова Наталия Валерьевна, см стр. 272.

IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА НАГРУЗКИ ТРЕХУРОВНЕВОГО КОНВЕРТОРА

Лазарева Н.М., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация: рассматривается DC-DC преобразователь для питания собственных нужд станций и подстанций, приводится расчет регулятора контура стабилизации тока нагрузки корневым методом.

Ключевые слова: трехуровневый конвертор, имитационное моделирование в Simulink, кривая разгона, передаточная функция, корневой метод, ПИ-регулятор.

Для преобразователей, работающих на высокой частоте переключения силовых транзисторов, актуальным является снижение динамических потерь. В трехуровневом конверторе (рис. 1) оно может быть достигнуто за счет коммутации ключей при нуле тока и нуле напряжения [1–4].

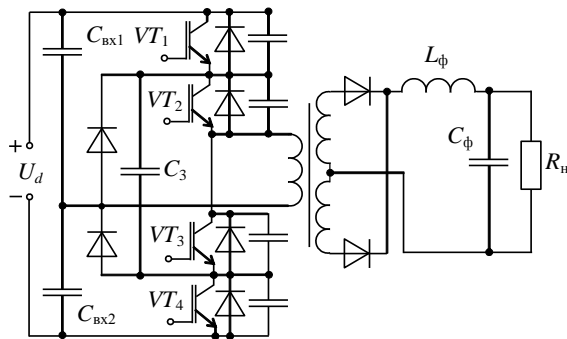


Рис. 1. Трехуровневый конвертор

Для регулирования электрического режима работы преобразователя можно использовать фазовый способ. На рис. 2 пока-

Секция 4

заны временные диаграммы работы системы управления, реализующей регулирование по принципу фазового сдвига.

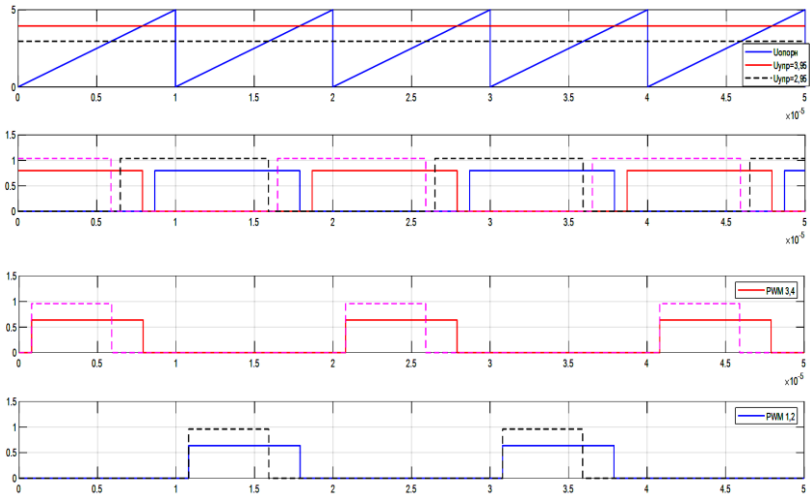


Рис. 2. Импульсы управления для двух значений $U_{упр}$

Значением сигнала $U_{упр}$ модулируется длительность импульсов управления (а соответственно и фазовый сдвиг) транзисторами VT1 и VT4. На рис. 2 хорошо видно, как изменяется время совместной работы VT1 и VT2, обозначенное как PWM1,2, и VT3 и VT4, обозначенное PWM3,4, в зависимости от значения $U_{упр}$ (с увеличением $U_{упр}$ время совместной работы соответствующих транзисторов увеличивается).

Для обеспечения стабильного значения тока нагрузки необходимо использовать систему управления, замкнутую по току нагрузки. В [6] были приведены частотные характеристики конвертора, построенные по его разгонной кривой [5, 7], и на их основе определена модель преобразователя с разомкнутой системой управления в виде передаточной функции

$$\begin{aligned}
 W(p) &= \frac{1}{(3,4643 \cdot 10^{-7} p^2 + 1,2939 \cdot 10^{-3} p + 1)} = \\
 &= \frac{1}{(9,1544 \cdot 10^{-4} p + 1)(3,7843 \cdot 10^{-4} p + 1)}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Секция 4

При изменении нагрузки вид кривой разгона может изменяться и аperiodический характер кривой разгона может нарушаться, и, как следствие, тип передаточной функции конвертора может изменяться. На рис. 3 приведены нормированные кривые разгона конвертора по току нагрузки для трех значений сопротивления нагрузки: $R_H = 0,1R_{H,НОМ}$, $R_{H,НОМ}$, $10R_{H,НОМ}$.

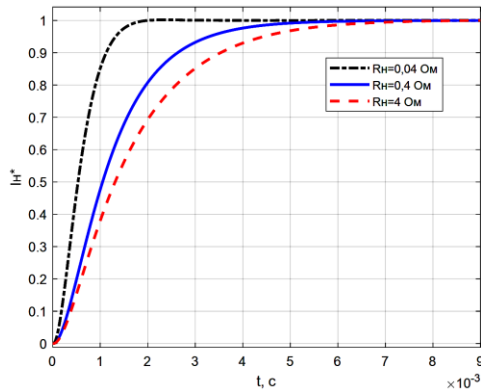


Рис. 3. Семейство кривых разгона конвертора для различных значений сопротивления нагрузки

Представленные графики свидетельствуют о том, что характер кривой разгона остается аperiodическим для достаточно широкого диапазона изменения значений R_H .

Для определения параметров регулятора электрического режима можно применить различные методы синтеза: с использованием интегральной оценки качества регулирования, по показателю колебательности, по распределению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости (методы корневого годографа и стандартных коэффициентов характеристического уравнения), по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам. Для объекта управления с передаточной функцией вида (1), не имеющей нулей, расчет параметров регулятора проще всего выполнить корневым методом [8-9].

Передаточная функция разомкнутой системы с ПИ-регулятором

Секция 4

$$W_p(p) = \frac{K/T_1T_2(K_{II}p + K_{II})}{p^3 + \frac{T_1+T_2}{T_1T_2}p^2 + \frac{1}{(T_1+T_2)}p} = \frac{K_oK_{II}p + K_oK_{II}}{p^3 + a_1p^2 + a_0p},$$

где $a_1 = \frac{T_1+T_2}{T_1T_2} = \frac{(9,1544+3,7843) \cdot 10^{-4}}{(9,1544 \cdot 3,7843) \cdot 10^{-8}} = 3,7349 \cdot 10^3;$

$$a_0 = \frac{1}{T_1T_2} = \frac{1}{(9,1544 \cdot 3,7843) \cdot 10^{-8}} = 2,8866 \cdot 10^6;$$

$$K_o = \frac{K}{T_1T_2} = \frac{1}{(9,1544 \cdot 3,7843) \cdot 10^{-8}} = 2,8866 \cdot 10^6.$$

Передаточная функция замкнутой системы

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{1}{1+W_p(p)} = \frac{1}{p^3 + a_1p^2 + a_0p + K_oK_{II}p + K_oK_{II}} = \\ &= \frac{1}{p^3 + a_1p^2 + (a_0 + K_oK_{II})p + K_oK_{II}}. \end{aligned}$$

Характеристический многочлен

$$\begin{aligned} H_3(p) &= p^3 + a_1p^2 + (a_0 + K_oK_{II})p + K_oK_{II} = \\ &= p^3 + 3\alpha p^2 + (3\alpha^2 + \beta^2)p + (\alpha^3 + \alpha\beta^2). \end{aligned}$$

Приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях

$$3\alpha = a_1 \quad (2)$$

$$3\alpha^2 + \beta^2 = a_0 + K_oK_{II} \quad (3)$$

$$\alpha^3 + \alpha\beta^2 = K_oK_{II} \quad (4)$$

Из (2) получаем $\alpha = \frac{a_1}{3} = \frac{3,7349 \cdot 10^3}{3} = 1,245 \cdot 10^3.$

Коэффициент β при вещественных корнях равен нулю.

Из (3) определяем коэффициент усиления ПИ-регулятора

$$K_{II} = \frac{3\alpha^2 - a_0}{K_o} = \frac{3(1,245 \cdot 10^3)^2 - (2,8866 \cdot 10^6)}{2,8866 \cdot 10^6} = 0,6.$$

Интегральный коэффициент передачи из (4)

$$K_n = \frac{\alpha^3}{K_o} = \frac{(1,245 \cdot 10^3)^3}{2,8866 \cdot 10^6} = 668.$$

На рис. 4 представлена нагрузочная характеристика конвертора с контуром стабилизации тока нагрузки: значение тока поддерживается неизменным и равным номинальному значению 120 А.

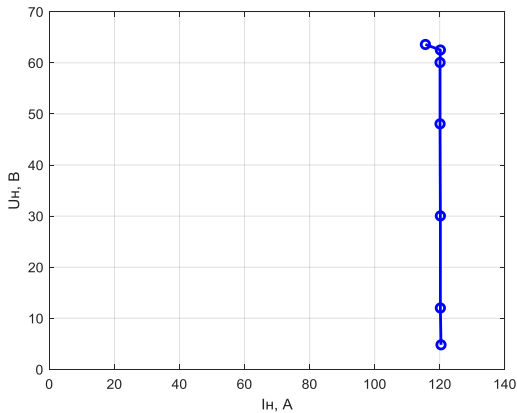


Рис. 4. Нагрузочная характеристика конвертора с контуром стабилизации тока нагрузки

Заключение

Трехуровневый конвертор по току нагрузки может быть моделирован апериодическим звеном второго порядка. Параметры ПИ-регулятора контура стабилизации тока нагрузки удобно определить корневым методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Исаков М.С.* Трехуровневый преобразователь, работающий с переключением при нуле напряжения // Практическая силовая электроника, 2007. № 26. С. 15–20.

2. *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Трехуровневый конвертор для питания собственных нужд станций и подстанций // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары, Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 111–115.

3. *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Трехуровневый транзисторный преобразователь с питанием от трехфазной сети // САПР и моделирование в современной электронике: Сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, Изд-во БГТУ, 2020. С. 341–345 (DOI: 10.51932/9785907271739_341).

4. *Колпаков А, Стаудт И.* Трехуровневые инверторы: теория и практика // Силовая электроника. 2014. № 5. С. 42–48.

5. *Лазарева Н. М.* Построение частотных характеристик устройства промышленной электроники по его разгонной переходной характеристике. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022614335, 18.03.2022.

6. *Быков К.В., Лазарева Н.М., Павлов Ю.В.* Передаточная функция трехуровневого конвертора // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары, Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 135–140.

7. *Лазарева Н.М.* Экспериментальное определение передаточных функций объектов управления // Вестник Чувашского университета, Чебоксары. Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 73-87.

8. Мостовой корректор коэффициента мощности / К.В. Быков [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 189–194.

9. *Лазарева Н.М.* Расчет параметров ПИ-регулятора режима работы устройства промышленной электроники корневым методом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022614336. Дата регистрации 18.03.2022.

Автор

Лазарева Надежда Михайловна, доцент кафедры промышленной электроники ЧувГУ им. И.Н. Ульянова, кандидат технических наук, доцент, окончила факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧувГУ им. И.Н. Ульянова в 1981 году, в 1997 году защитила диссертацию на тему «Алгоритмы структурной компрессии цифровых осциллограмм сигналов электроэнергетических систем». E-mail: lana21lana21@mail.ru.

РАСЧЕТ МАГНИТОУПРУГОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ МАГНИТОПРОВОДА

Жураева К.К., Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Узбекистан

***Аннотация:** В статье приведен расчёт магнитоупругого преобразователя механической величины в зависимости от свойств магнитопровода. Приведена блочно-функциональная схема взаимодействия между возбуждающим элементом, поверхностью чувствительно элемента и измерительным электромагнитом. Исходя из цели расчёта было выбрано оптимальное значение напряженности магнитного поля, чтобы получить требуемой напряженности магнитного поля на поверхности чувствительного элемента.*

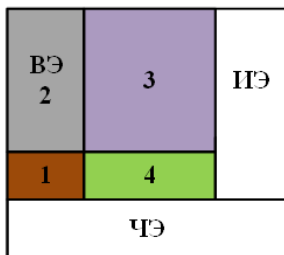
***Ключевые слова:** механическая величина, магнитоупругий преобразователь, чувствительный элемент, магнитопровод, параметры магнитной цепи, магнитное сопротивление, магнитный поток, магнитное напряжение.*

Известные магнитоупругие преобразователи (МУП) механической величины основаны на эффекте магнитоупругости, который заключается в изменении доменной структуры ферромагнетиков при их деформации и электромагнитных свойств самого материала рассмотрены в различных исследованиях [1, 2, 3].

При приложении к валу крутящего момента на нем возникает магнитоупругость. В результате которого может быть зафиксирован крутящий момент, пропорциональный изменению приложенного электромагнитного поля.

В качестве примера рассмотрим МУП, состоящий из одного кольца с четырьмя катушками, возбуждающими электромагнитное поле на чувствительном элементе и двух колец с восемью измерительными катушками, которые фиксируют изменение электромагнитного поля [4], блочная функциональная схема которого приведена на рисунке.

Блочная функциональная схема преобразователя показана в виде четырех областей проводимости, которые необходимо рассчитать: 1 – зазор между возбуждающим элементом (ВЭ) и поверхностью чувствительно элемента (ЧЭ), 2 – область внутри ВЭ, 3 – область между ВЭ и измерительным электромагнитом (ИЭ), 4 – промежуточная область между ВЭ, ЧЭ и ИЭ.



Блочная функциональная схема взаимодействия ВЭ, ИЭ и ЧЭ

Согласно принципу действия преобразователя изменение электромагнитного поля на измерительных катушках образует разность ЭДС, которая пропорциональна к приложенному усилию чувствительного элемента.

Целью расчета магнитной цепи данного магнитоупругого преобразователя является получение требуемой напряженности магнитного поля на поверхности чувствительного элемента (ЧЭ), что бы в точке с координатами 0,0 на поверхности ЧЭ было принято оптимальное значение напряженности магнитного поля.

$$H_H = (1,3 \div 1,5) H_M, \quad (1)$$

где H_H – напряженность поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости материала, $\frac{A}{cm}$.

Из справочника по магнитным свойствам электротехнической стали выбираем магнитную напряженность H_M :

$$H_M = 10 \frac{A}{cm};$$

$$H_H = (1,3 \div 1,5) 10 = 15 \frac{A}{cm}. \quad (2)$$

Удельную проводимость стали при расчетах принимаем 40:

$$\gamma = 5 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}.$$

Для определения магнитного сопротивления участка ЧЭ между соседними полюсами (Z_B) используем следующее выражение:

Секция 4

$$Z_B = \frac{2\xi}{\pi\chi_n(1-\beta_0)} \left[\ln \frac{8a}{\pi d'} - \beta_0 \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{d'}{2a} \right) \right] \exp(j\theta), \quad (3)$$

где $\xi = 0,86$ – коэффициент, характеризующий напряженность магнитного поля;

$\chi_n = 0,68$ мкГ – эквивалентная проницаемость;

β_0 – коэффициент, характеризующий степень насыщения ЧЭ;

d' – расчетный диаметр полюса возбуждающего элемента, мм;

$\theta = \frac{\pi}{3}$ – фазовый угол при $\xi = 0,86$.

Коэффициент, характеризующий степень насыщения β_0 определяется из следующей формулы:

$$\beta_0 = \frac{v_0}{v_n}, \quad (4)$$

где v_0 и v_n – магнитные сопротивления ферромагнитного тела, определяемые из графика $H(v)$ приведенного в [5]:

$$v_0 = 0,52 \frac{\text{МВб}}{\text{м}};$$

$$v_n = 1,03 \frac{\text{МВб}}{\text{м}}.$$

Подставляя в (4) имеем:

$$\beta_0 = \frac{0,52}{1,03} = 0,504.$$

Из-за потоков выпучивания расчетный диаметр полюса возбуждающего элемента превышает конструктивный диаметр d :

$$d' = 1,2 \cdot d;$$

$$d' = 1,2 \cdot 30 = 36 \text{ мм}.$$

Подставляя в (3) вычислим магнитное сопротивление участка ЧЭ:

$$Z_B = \frac{2 \cdot 0,86}{\pi \cdot 0,68 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,504)} \times \\ \times \left[\ln \frac{8 \cdot 36,13}{\pi \cdot 36} - 0,504 \cdot \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{36}{2 \cdot 36,13} \right) \right] \exp \left(j \frac{\pi}{3} \right) = \\ = (0,439 + j0,760) \frac{1}{\text{мкГн}}.$$

При напряженности магнитного поля H_n в точке с координатами (0; 0) магнитный поток Φ_B , проходящий через ЧЭ определяется следующим выражением:

$$\Phi_B = \frac{2}{\xi} a \cdot \chi_n \cdot H_n \cdot \exp(-j\theta), \\ \Phi_B = \frac{2}{0,86} \cdot 36,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,68 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^2 \cdot \exp \left(-j \cdot \frac{\pi}{3} \right) = \\ = (48,85 - j74,22) \text{ мкВб}.$$

В этом случае магнитодвижущую силу, индуцируемую на поверхности ЧЭ находим по формуле:

$$F_B = Z_B \cdot \Phi_B; \\ F_B = (0,439 + j0,760) \cdot 10^6 \cdot (48,85 - j74,22) \cdot 10^{-6} = 75,3 \text{ А}.$$

Магнитный поток в зазоре определяем из:

$$\Phi_3 = k_N \cdot \Phi_B,$$

где $k_N = 2$ – коэффициент определяемый типом МУП.

Отсюда: $\Phi_3 = 2 \cdot (48,85 - j74,22) \cdot 10^{-6} = (85,7 - j148,44) \text{ мкВб}$.

Магнитное сопротивление зазора имеет следующий вид:

$$R_3 = \frac{1}{d' \cdot \mu_0 \left(\frac{\pi d'}{4\delta} + \frac{0,36d'}{1,2d' + \delta} + 0,96 \right)},$$

где $\mu_0 = 1,257 \frac{\text{мкГн}}{\text{м}}$ – магнитная проницаемость воздуха.

$$R_3 = \frac{1}{36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,257 \cdot 10^6 \left(\frac{\pi \cdot 36}{4 \cdot 1} + \frac{0,36 \cdot 36}{1,2 \cdot 36 + 1} \right)} = 0,748 \frac{1}{\text{мкГн}}.$$

Заключение

В работе были рассмотрены методы косвенного измерения механической величины и рассчитаны магнитные параметры преобразователя, такие как магнитное сопротивление, магнитный поток, магнитное напряжение и магнитное сопротивление зазора, которые зависят от свойств магнитопровода.

Полученные результаты будут использованы для построения статической характеристики и сопоставляются с теоретическими данными, для выбора типа и конструкции преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Магнитоупругие датчики усилий для систем контроля и управления объектами железнодорожного транспорта. Ташкент: издательство «Fan va texnologiya», 2019 – 162 с.

2. Кутыловский О.Л. Исследование магнитоупругих свойств амфорных ферромагнетиков с целью их применения в магнитных и механических датчиках. – дисс на соискание д.т.н., Екатеринбург, 1997 г., 218 с.

3. Jurayeva K., Sattarov Kh. Issues of investigation of the dependence of static characteristics of magnetoelastic converters of mechanical quantities on the influence of external. E3S Web of Conferences, 2023, 389, 01060

4. Левинтов С.Д. Безконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента / С.Д. Левинтов, А.М. Борисов – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88с

5. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Под. ред. В.Д. Дурнева. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000 – 224 с.

Автор

Жураева Камила Комиловна, PhD по техническим наукам, доцент, докторант кафедры «Электроснабжения» Ташкентского государственного транспортного университета. Окончила Электромеханический факультет Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта в 2009 году. В 2019 году получила ученую степень и защитила диссертацию по тематике «Магнитоупругие датчики усилий для систем контроля и управления объектами железнодорожного транспорта». E-mail: lade00@bk.ru.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОБОЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИЗОЛЯТОРА

Тихомиров А.А., Величко А.А., Скорняков С.М., ФГБОУ
ВО «Петрозаводский государственный университет»,
г. Петрозаводск, Россия

***Аннотация.** В работе проведена экспериментальная установка для исследования импульса электромагнитного излучения при пробое высоковольтного изолятора. Полученные данные о длительности искрового пробоя и влиянии влажности изоляторов на интенсивность электромагнитного излучения.*

***Ключевые слова:** высоковольтный изолятор, электромагнитное излучение, линия электропередачи, повреждение.*

Постепенное снижения качества изоляции высоковольтных линий электропередачи, например, за счет загрязнения поверхностей, образования проводящих линий при частичных разрядах может приводить к аварийным режимам. Развитие методов диагностики повреждения высоковольтных изоляторов является актуальной задачей и способствует повышению надежности электрических сетей [1]. В [2] описана экспериментальная установка для изучения электромагнитного излучения для тестирования состояния изоляции на основании амплитудно-фазовых характеристик. Бесконтактные методы диагностики основанные на регистрации электромагнитного излучения от поврежденного электрооборудования могут быть усовершенствованы за счет применения нейронных сетей, которые позволяют реализовать технологию распознавания места повреждения по набору данных описывающих развитие разряда.

Целью работы являлось исследование электромагнитного излучения возникающего при пробое поврежденного высоковольтного изолятора для определения места повреждения.

Схема экспериментальной установки для осуществления электрического пробоя поврежденного изолятора приведена на рис. 1.

Напряжение сети с помощью ЛАТР регулировалось в пределах от 0 до 220 В, в качестве повышающего трансформатора

Секция 4

использовался газосветный трансформатор 220 В/10 кВ. Емкость установленная параллельно выходу газосветного трансформатора равна 10 пФ. На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для измерения электромагнитного излучения при пробое высоковольтного изолятора.

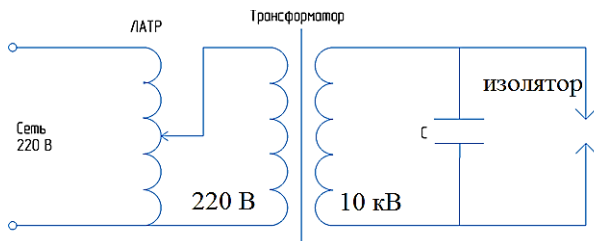


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для пробоя высоковольтного изолятора

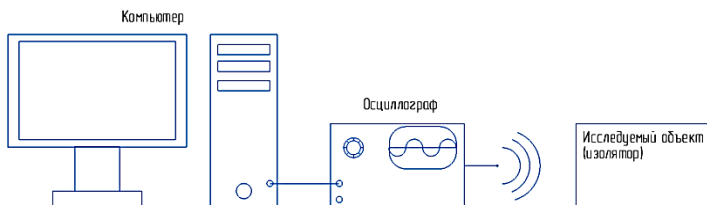


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения электромагнитного излучения

В качестве компьютера использовался ноутбук с независимым внутренним источником питания, которому подключался осциллограф. Для регистрации импульсов использовалась широко диапазонная антенна DIAMOND RH 771 (144/430 МГц).

В качестве исследуемых объектов, были выбраны поврежденные стеклянные штыревые изоляторы ШТИЗ-10Б, которые были установлены на действующей линии 10 кВ. В лабораторных условиях было проведено испытание пробоя изоляторов напряжением 10 кВ, регулируемым лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). На рис. 3 представлен внешний вид поврежденного изолятора ШТИЗ-10Б.



Рис. 3. Внешний вид поврежденного изолятора ШТИЗ 10Б

Пробой происходил по образовавшимся сколами и трещинам (рис. 4). Изменяя подаваемое напряжение на изолятор, можно было наблюдать хаотичный характер возникновения разрядов по сколам и трещинам в изоляторе.



Рис. 4. Внешний вид поврежденного изолятора ШТИЗ 10Б

Измерение электромагнитных импульсов пробоя высоковольтного разряда производилось на расстоянии 4 метров от высоковольтного изолятора. На рис. 5 приведена осциллограмма импульса электромагнитного излучения при пробое сухого изолятора.

На рис. 6 представлена осциллограмма импульса электромагнитного излучения в условиях влажного изолятора.

Из приведенных осциллограмм следует, что увлажнение поверхности высоковольтного изолятора приводит к существенному возрастанию амплитуды импульса электромагнитного излучения.

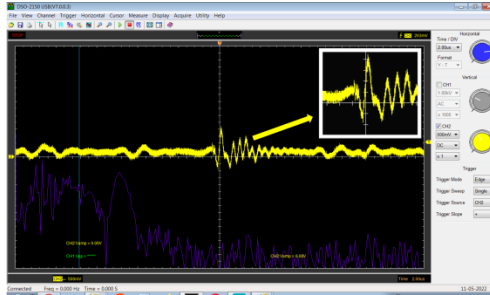


Рис. 5. Осциллограмма импульса электромагнитного излучения при пробое сухого изолятора ШТИЗ 10Б

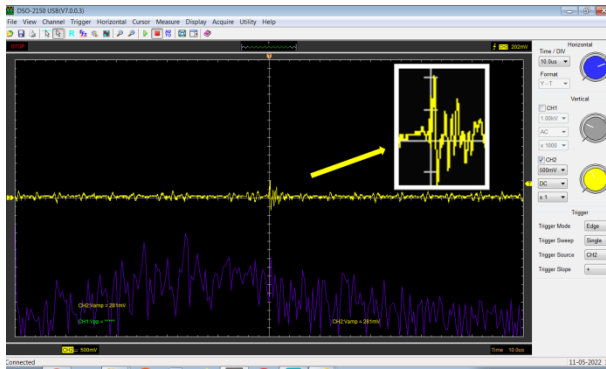


Рис. 6. Осциллограмма импульса электромагнитного излучения при пробое изолятора ШТИЗ 10Б с увлажненной поверхностью

Выводы

Амплитудные значения импульсов электромагнитного излучения при пробое изоляторов меняются со сменой условий эксплуатации. В проведенных исследованиях в условиях с повышенной влажностью значения максимального амплитудного колебания наведенного напряжения при пробое высоковольтного изолятора практически в 2 раза больше, чем в сухих. Длительность электромагнитного импульса составляет порядка нескольких микросекунд. Полученные осциллограммы могут быть использованы для обучения нейросети для распознавания места повреждения изоляции в электрических сетях.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голенищев-Кутузов А.В.* Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах / А.В. Голенищев-Кутузов [и др.] // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 2. С. 117

2. *Галиева Т.Г.* Разработка лабораторного стенда диагностики высоковольтных изоляторов на основе регистрации электромагнитного и акустического излучений / Т.Г. Галиева, А.Д. Арсланов // Материалы Международной молодежной научной конференции. Казань, 2021. Т. 1. С. 170–173

Авторы:

Тихомиров Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Петрозаводский государственный университет. Окончил Физико-технический факультет Петрозаводского государственного университета в 2005 году, защитил кандидатскую диссертацию в 2009 году по тематике физики газового разряда. E-mail: sasha.82@mail.ru.

Величко Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Петрозаводский государственный университет. Окончил Физико-технический факультет, Петрозаводского государственного университета в 1999 году, защитил кандидатскую диссертацию в 2003 году по тематике физической электроники. E-mail: velichko@petrsu.ru.

Скорняков Сергей Михайлович, студент 1 курса магистратуры направления 12.04.01 Приборостроение. E-mail: skornyakovs.sergei@yandex.ru.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Федотов А.Ю., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Солнечная фотоэлектрическая станция, подключенная к распределительной сети, может участвовать в регулировании параметров сети. Для этого в системе управления инвертором реализуется метод управления с применением статизма по напряжению и частоте так, что они самостоятельно участвуют в регулировании параметров сети в пределах своих возможностей. Также может быть реализована концепция «виртуальной синхронной машины» при наличии накопителя энергии, что позволяет увеличить суммарную инерцию энергосистемы и повысить ее надежность.*

***Ключевые слова:** Солнечные электрические станции, фотомодули, функции управления инвертором.*

Инверторы, работающие параллельно с электрической сетью, могут быть инверторами тока (CSI) или инверторами напряжения (VSI). В инверторе тока (CSI) постоянный ток на входе устройства поддерживается неизменным с помощью катушки с большой индуктивностью. В них ток переключают тиристоры. Современные тиристоры способны коммутировать постоянный ток до 6,25 кА. Инверторы тока на основе этих тиристоров находят применение на линиях постоянного тока высокого напряжения пропускной способностью до 12 ГВт и напряжением 1050 кВ (линия Changji – Guquan в Китае).

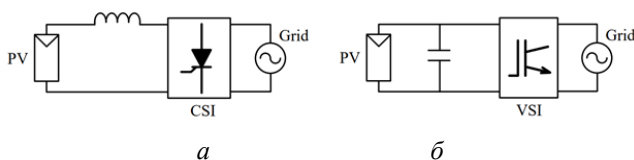


Рис. 1. Инвертор тока (а) и напряжения (б)

В инверторах напряжения переменное напряжение на выходе устройства формируется напряжением конденсатора, подключенного параллельно к источнику питания. Это позволяет уменьшить внутреннее сопротивление источника. В инверторах

напряжения обычно используются биполярные (IGBT) и полевые (MOSFET) транзисторы. На СЭС наибольшее распространение получили инверторы напряжения, так как они дешевле и эффективнее инверторов тока, поскольку конденсатор характеризуется меньшими потерями и низкой стоимостью по сравнению с дросселем (катушкой индуктивности) инвертора тока.

Системы управления инвертором

В зависимости от системы управления, инверторы напряжения, работающие параллельно электрической сети, могут быть формирующими, питающими или поддерживающими сеть. Инверторы, поддерживающие сеть, могут рассматриваться как источник напряжения, так и как источник тока [1, 3].

Инверторы, формирующие сеть, представляют собой преобразователи мощности, предназначенные для автономной работы (рис. 2, а). Они рассматриваются как идеальные источники переменного напряжения $U_{оп}$ с фиксированной частотой $\omega_{оп}$. Схема управления состоит из двух контуров управления во вращающейся двухфазной системе координат $dq0$, внешний контур отвечает за регулирование напряжения, а внутренний контур отвечает за регулирование тока. В точке присоединения станции к электрической сети (РСС) измеряются ток и напряжение, которые с помощью преобразования Парка-Горева представляются постоянными значениями в $dq0$ -координатах и сравниваются с опорными значениями.

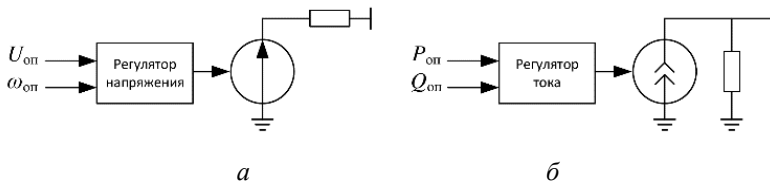


Рис. 2. Упрощенное представление инверторов, формирующего сеть (а) и питающего сеть (б)

Инверторы, питающие электрическую сеть, в основном используются для генерации мощности с определенным соотношением активной и реактивной составляющих (рис. 2, б). Эти инверторы могут быть представлены как идеальные источники

тока, подключенные к сети параллельно и имеющие высокое параллельное выходное сопротивление. В системе управления инвертором, питающим электрическую сеть, управление выходным напряжением не осуществляется, оно принимается равным измеренному значению напряжения в точке подключения станции к сети, и поэтому в системе управления присутствует только контур регулирования тока. На выходе инвертора формируется ток в соответствии с измеренным напряжением исходя из заданных активной P и реактивной мощности Q . Для определения частоты, как правило, используются методы фазовой автоподстройки частоты. Инверторы, питающие сеть, не могут функционировать при отсутствии источника напряжения с заданной частотой, с которым инвертор синхронизируется. Это может быть либо инвертор, формирующий или поддерживающий сеть, либо синхронный генератор, задающий напряжение и частоту электрической сети [1].

Инверторы, поддерживающие сеть, предназначены для участия в регулировании напряжения сети (путем генерации/потребления реактивной мощности) и частоты (путем изменения генерации активной мощности) электрической сети. Они подразделяются два основных типа: управляемые как источник напряжения (рис. 3, *а*) и как источник тока (рис. 3, *б*).

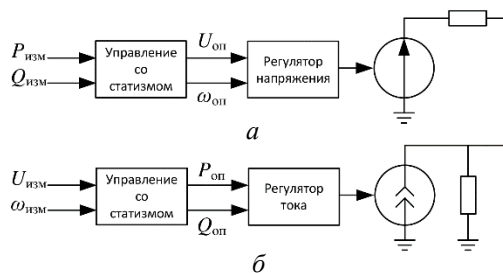


Рис. 3. Упрощенное представление поддерживающих сеть инверторов, работающих как источник тока (*а*) и как источник напряжения (*б*)

В этих инверторах регулируется выходное напряжение (ток) для поддержания частоты сети и амплитуды напряжения близкой к номинальным значениям. Инверторы, поддерживающие сеть, занимают промежуточное положение между инверто-

рами, формирующими сеть и питающими сеть. Основной задачей этих устройств является обеспечение генерации активной и реактивной мощности для регулирования частоты и напряжения электрической сети. При этом, когда инвертор, поддерживающий сеть, управляется как источник тока, то для его функционирования требуется источник напряжения с заданной частотой. Когда инвертор, поддерживающий сеть, управляется как источник напряжения, то он может работать как параллельно электрической сети, так и в автономном режиме.

Из инверторов, поддерживающих сеть, большее распространение получили инверторы, управляемые как источник тока, поскольку система управления получается проще и позволяет достичь высокого коэффициента мощности. К тому же регулирование выходного тока инвертора позволяет смягчить переходные процессы и гармонические искажения тока. В то же время инверторы, поддерживающие сеть и управляемые как источник напряжения, по своему поведению ближе к синхронным генераторам и могут реализовать «виртуальную инерцию» повышая устойчивость энергосистемы.

Управление инвертором с применением статизма

В отличие от синхронных генераторов инверторы не имеют вращающихся элементов (роторов), и, соответственно, у них нет физической связи между частотой и активной мощностью. Поэтому для участия в регулировании параметров сети, инверторы, поддерживающие сеть, управляются таким образом, чтобы они имитировали характеристики синхронных генераторов. Для управления мощностью инверторов солнечных фотоэлектрических станций широко распространен метод управления с применением статизма по напряжению и по частоте [2]. Этот метод позволяет распределить нагрузку между станциями и расширить рабочий диапазон активной (P) и реактивной (Q) номинальной мощности инвертора. Суть метода заключается в изменении напряжения и частоты в точке присоединения станции к электрической сети и, при необходимости, соответствующее изменение генерируемой активной и реактивной мощности таким образом, чтобы инвертор имитировал поведение синхронного генератора. Управление по $Q-U$ -характеристике осуществ-

Секция 4

ляется при участии в регулировании напряжения в точке присоединения станции к электрической сети, в то время как управление по P - ω -характеристике – при участии в регулировании частоты.

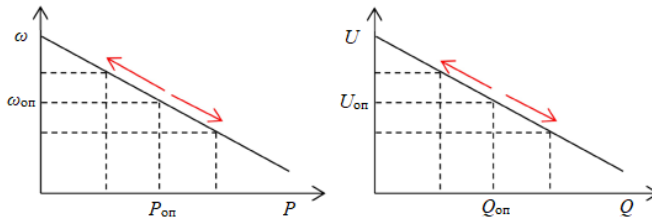


Рис. 4. Характеристики управления со статизмом

В отличие от синхронного генератора, который использует скорость своего ротора в качестве входной частоты для управления по P - ω -характеристике, инвертор, поддерживающий сеть и управляемый как источник тока, не устанавливает частоту, а измеряет частоту сети с помощью контура фазовой автоподстройки частоты (PLL), а затем работает на этом измеренном уровне частоты. При участии в регулировании частоты инвертор соответствующим образом регулирует свою мощность, сравнивая измеренную частоту с опорным значением (номинальной частотой сети):

$$P(\omega) = P_{\text{оп}} - (\omega_{\text{оп}} - \omega)k_{\omega},$$

где $P_{\text{оп}}$ – активная мощность, отдаваемая инвертором при заданной частоте $\omega_{\text{оп}}$, а k_{ω} – коэффициент статизма по частоте, который определяет, насколько изменится активная мощность P в ответ на изменение частоты ω .

При участии в регулировании напряжения используется Q - U -характеристика, инвертор, поддерживающий сеть и управляемый как источник тока, сравнивает напряжения измеренное в точке присоединения станции к электрической сети с опорным значением:

$$Q(U) = Q_{\text{оп}} - (U_{\text{оп}} - U)k_U,$$

где $Q_{\text{оп}}$ – реактивная мощность, отдаваемая/потребляемая инвертором при заданном напряжении $U_{\text{оп}}$, а k_U – коэффициент статиз-

ма по напряжению, который определяет, насколько изменится реактивная мощность Q в ответ на изменение напряжения U .

Инвертор, поддерживающий сеть и управляемый как источник напряжения, использует измеренную активную мощность на выходе устройства для регулирования частоты выходного сигнала самого инвертора и измеренную реактивную мощность для регулирования своего выходного напряжения [2]. Таким образом, он функционирует схожим с синхронным генератором способом. Характеристики управления описываются следующими уравнениями:

$$\omega(P) = (P_{\text{оп}} - P)k_P - \omega_{\text{оп}},$$

$$U(Q) = (Q_{\text{оп}} - Q)k_Q - U_{\text{оп}},$$

где k_P – коэффициент статизма по активной мощности, определяющий, насколько изменится частота ω в ответ на изменение мощности P ;

k_Q – коэффициент статизма по реактивной мощности, определяющий, насколько изменится напряжение U в ответ на изменение реактивной мощности Q .

Виртуальная синхронная машина

Увеличение доли возобновляемой генерации на основе СФЭС в энергосистеме приводит к снижению суммарной инерции генерирующих устройств относительно установленной мощности. Эффективным способом компенсации негативных эффектов снижения инерции является использование «виртуальных синхронных машин». Контур управления инвертором (рис. 5), отвечающий за формирование напряжения и тока, может быть дополнен блоком «виртуальной» инерции, чтобы инвертор лучше имитировал поведение синхронного генератора. В основном для обеспечения «виртуальной» инерции требуются накопители энергии, однако при работе СФЭС в режиме ограниченной мощности, оставшийся резерв можно использовать для создания инерции.

Виртуальная синхронная машина (*VSM – virtual synchronous machine*) представляет собой способ управления инвертором, в котором используются уравнения математической модели синхронной машины для описания ее поведения в установившемся

и переходных режимах, тем самым добавляя виртуальную инерцию в энергосистему [3, 4].

Часто за основу *VSM* (рис. 6) принимается уравнение движения синхронной машины без учета электромагнитной части:

$$P_m - P_{эл} = J\omega_{НОМ} \frac{d\omega}{dt} + D\omega_{НОМ} (\omega - \omega_{НОМ});$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega,$$

где P_m – механическая мощность, $P_{эл}$ – измеренная активная мощность, J – виртуальная инерция генератора, D – демпфирующий коэффициент.

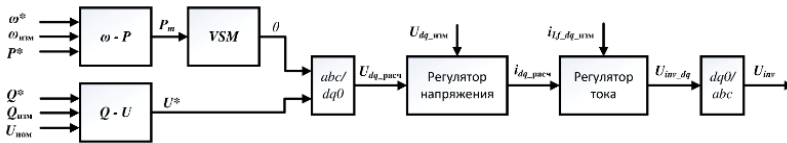


Рис. 5. Структурная схема системы управления инвертором

Во внешнем контуре определяется величина напряжения и электрический угол ротора *VSM*. Этот контур можно разделить на три части: ω - P – регулятор, *VSM* с уравнением движения и Q - U -регулятор.

Промежуточный регулятор напряжения и внутренний регулятор тока реализованы в $dq0$ -координатах, что позволяет разделить регулирование активной и реактивной мощности. Входные трехфазные сигналы регулятора напряжения преобразуются во вращающиеся вектора с помощью преобразования Парка-Горева. Выходные сигналы регулятора тока после преобразования из вращающихся векторов в трехфазные величины используются для формирования управляющих импульсов инвертора.

Заключение

Инверторы, формирующие сеть, применяются только в автономных, изолированных от сети, энергосистемах. Инверторы, питающие сеть, передают генерируемую мощность в электрическую сеть и, самостоятельно в регулировании ее параметров не участвуют. В инверторах, поддерживающих сеть широко рас-

пространен метод управления с применением статизма по напряжения и частоте так, что они самостоятельно участвуют в регулировании параметров сети в пределах своих возможностей. В них может быть реализована концепция «виртуальной синхронной машины», что позволяет увеличить суммарную инерцию энергосистемы и повысить ее надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2199334.

2. Opiyo, N.N. Droop Control Methods for PV-Based Mini Grids with Different Line Resistances and Impedances. Smart Grid and Renewable Energy, 9, 2018, 101-112. DOI: 10.4236/sgre.2018.96007.

3. K.M. Cheema, et al. Virtual synchronous generator: Modifications, stability assessment and future applications, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 1704-1717, ISSN 2352-4847, DOI: 10.1016/j.egy.2021.12.064.

4. Федотов А.Ю. Применение виртуальной синхронной машины в системе управления инвертором солнечной электростанции / А.Ю. Федотов // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XLIV Международной научно-технической конференции. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова. – 2023. С. 476-480.

Автор

Федотов Александр Юрьевич, инженер I категории, ООО НПП «ЭКРА». В 2015 году окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Аспирант кафедры ТОЭ и РЗА факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова.
E-mail: fedotov_ay@ekra.ru.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОПРОВОДНИКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО СПОСОБА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Быковский А.А., филиал АО «НПО им. С.А. Лавочкина»,
г. Калуга, Россия

***Аннотация.** Приведены расчётные значения геометрических параметров трёх вариантов исполнения стенда для исследования однопроводникового резонансного способа передачи электричества. Приведены расчётные значения коэффициентов потерь данных стендов для задачи их экспериментальной проверки, а также экспериментальной проверки создаваемой теории резонансного способа передачи электричества в целом.*

***Ключевые слова:** резонансные системы передачи электричества, резонансный трансформатор Тесла, электротехнический расчёт, коэффициенты потерь.*

На сегодняшний день теория резонансного способа передачи электрической энергии представлена в двух книгах [1] (шесть редакций книги) и [2, глава 14]. С одной стороны, наличие большого количества «белых пятен» в теории расчёта резонансных систем по передаче электричества, а с другой стороны, чрезвычайная перспективность и широкие возможности применения данного способа побудило автора статьи (с 2015 года) к теоретическим исследованиям данной проблематики, написано по данной теме и опубликовано более 40 статей.

Логическим продолжением теоретических исследований является подтверждение / опровержение их практикой. Для данной задачи необходимо создать экспериментальный стенд, который наглядно продемонстрирует степень правильности теоретического понимания автором физики резонансного способа передачи электричества.

Экспериментальный стенд представляет собой резонансную систему, состоящую из: пары идентичных друг другу резонансных трансформаторов Тесла (РТТ) (один подключен к генератору, другой – к нагрузке) и однопроводниковой резонансной электрической линии (ОРЭЛ), подключенной своими концами к верху катушек-осцилляторов (КО) РТТ. Все три элемента резонансной системы должны работать на единой для них резонансной частоте.

Секция 4

РТТ состоит из двух соосных и работающих на одинаковой резонансной частоте катушек. Катушка большего диаметра – катушка накачки (КН). Выполнена из толстого многожильного провода (литцендрата). Внутри КН располагается катушка-осциллятор. Она выполнена намоткой тонкого одножильного провода в изоляции на диэлектрический цилиндр.

Для получения более информативной обратной связи от эксперимента стенд необходимо изготовить в трёх исполнениях на три разных резонансных частоты. Также необходимо предусмотреть возможность подключения к каждой из пар РТТ трёх разных длин ОРЭЛ. Эти длины, согласно теории, должны составлять целое нечётное количество четвертьволновых отрезков длины электромагнитной волны на данной резонансной частоте.

Расчётные параметры геометрии КО РТТ для трёх вариантов исполнения экспериментального стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Название параметра	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
	Четверть длины волны		
	30 метров	60 метров	90 метров
Диэлектрическая проницаемость диэлектрика провода ϵ_{r2}	2,25	2,25	2,25
Тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика провода $\operatorname{tg} \delta_2$	0,00025	0,00025	0,00025
Резонансная частота $f_{\text{рез}}$, Гц	1665514	832757	555171
Высота КО H_2 , м	0,107	0,151	0,185
Диаметр КО D_2 , м	0,100	0,142	0,174
Диаметр провода КО по жиле $d_{\text{ж}2}$, м	0,001	0,001	0,001
Диаметр провода КО по изоляции $d_{\text{и}2}$, м	0,00107	0,00107	0,00107
Межвитковое расстояние s_2 , м	0,00112	0,00112	0,00112
Коэффициент неплотности намотки провода КО $k_{\text{НН}}$	1,05	1,05	1,05
Коэффициент Нагаока КО K_{a2}	0,7026	0,7026	0,7026
Количество витков провода КО w_2 , шт.	95,3	134,7	165,0

Секция 4

Расчётные параметры геометрии КН РТТ для трёх вариантов исполнения экспериментального стенда приведены в табл. 2.

Таблица 2

Название параметра	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
	Четверть длины волны		
	30 метров	60 метров	90 метров
Диэлектрическая проницаемость диэлектрика провода ϵ_{r1}	2,25	2,25	2,25
Тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика провода $\operatorname{tg} \delta_1$	0,00025	0,00025	0,00025
Резонансная частота $f_{\text{рез}}$, Гц	1665514	832757	555171
Высота КН H_1 , м	0,029	0,044	0,055
Диаметр КН D_1 , м	0,124	0,166	0,198
Диаметр жил литцендрата КН $d_{\text{жл}}$, м	0,0009	0,0009	0,0009
Диаметр литцендрата КН по изоляции $d\Sigma_{\text{ил}}$, м	0,0231	0,0231	0,0231
Коэффициент Нагаока КО $K_{\text{ол}}$	0,3511	0,3761	0,3880
Количество витков провода КН w_1 , шт	1,2	1,8	2,26

Расчётные параметры геометрии ОРЭЛ для трёх вариантов исполнения экспериментального стенда приведены в табл. 3.

Таблица 3

Название параметра	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
	Четверть длины волны		
	30 метров	60 метров	90 метров
Диэлектрическая проницаемость диэлектрика провода $\epsilon_{rл}$	2,25	2,25	2,25
Тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика провода $\operatorname{tg} \delta_{л}$	0,00025	0,00025	0,00025
Резонансная частота $f_{\text{рез}}$, Гц	1665514	832757	555171
Диаметр провода ОРЭЛ по жиле $d_{\text{жл}}$, м	0,0005	0,0005	0,0005
Диаметр провода ОРЭЛ по изоляции $d_{\text{ил}}$, м	0,00544	0,00544	0,00544

Секция 4

Основной параметр теории резонансной передачи электроэнергии, который подлежит экспериментальной проверке, это суммарные потери резонансной системы при передаче.

Значения длин ОРЭЛ экспериментального стенда приведены в табл. 4.

Таблица 4

Название параметра	Резонансная частота		
	$f_{рез}=1665514$ Гц	$f_{рез}=832757$ Гц	$f_{рез}=555171$ Гц
Длина ОРЭЛ 1/4 длины волны, м	30	60	90
Длина ОРЭЛ 3/4 длины волны, м	90	180	270
Длина ОРЭЛ 5/4 длины волны, м	150	300	450

Расчётные значения потерь передаваемой электрической мощности экспериментального стенда приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Название параметра	Резонансная частота		
	$f_{рез}=1665514$ Гц	$f_{рез}=832757$ Гц	$f_{рез}=555171$ Гц
Для длины ОРЭЛ 1/4 длины волны	3,05 %	1,78 %	1,66 %
Для длины ОРЭЛ 3/4 длины волны	5,45 %	2,15 %	1,81 %
Для длины ОРЭЛ 5/4 длины волны	10,21 %	2,81 %	2,06 %

Значения потерь передаваемой электрической мощности экспериментального стенда на 1 метр длины ОРЭЛ приведены в табл. 6.

Необходимо отметить, что значения потерь, приведённые в табл. 6, не отражают реальных возможностей резонансных систем по минимизации потерь электрической энергии при её передаче, так как оптимальный диапазон резонансных частот лежит в пределах от 6 до 60 КГц, что более чем на порядок ниже, применяемых в исполнениях экспериментального стенда. При-

Секция 4

менение же высокой частоты в стенде позволяет существенно сократить его габариты и материалоёмкость и, как следствие, уменьшить и стоимость его изготовления, и стоимость проведения инженерных экспериментов.

Таблица 6

Название параметра	Резонансная частота		
	$f_{рез}=1665514$ Гц	$f_{рез}=832757$ Гц	$f_{рез}=555171$ Гц
Длина ОРЭЛ 1/4 длины волны, м	0,1015 %	0,0297 %	0,0185 %
Длина ОРЭЛ 3/4 длины волны, м	0,0606%	0,0119%	0,0067%
Длина ОРЭЛ 5/4 длины волны, м	0,0681%	0,0094%	0,0046%

Выводы

Изготовление экспериментального стенда по исходным данным табл. 1-4 позволит экспериментально подтвердить/опровергнуть авторские представления о теории резонансного способа передачи электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы получения, передачи и применения электрической энергии. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: ФБГНУ ФНАЦ ВИМ, 2018. – 572 с.
2. Шогенов А.Х. Теория электрических цепей: учеб. пособие для СТО / Шогенов А.Х., Стребков Д.С. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 248 с. – Серия: Профессиональное образование.

Автор

Быковский Алексей Александрович, инженер-конструктор филиала АО «НПО им. С.А. Лавочкина» в г. Калуга. Окончил факультет «Технология машиностроения» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 году. E-mail: alby76@yandex.ru.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И ЕМКОСТИ ВХОДНОГО КОНДЕНСАТОРА ИНВЕРТОРА СИЛОВОГО МОДУЛЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Охоткин Г.П., Малинин Г.В., Лазарева Н.М., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Селивестров Н.В., ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В работе разработан виртуальный прибор для расчета токов и напряжений, мощности и энергии модульного многоуровневого преобразователя и емкости входного конденсатора инвертора силового модуля на LabVIEW. Удобная лицевая панель виртуального прибора позволяет наглядно вводить исходные данные для расчета и отображать на экране кривые исследуемых переменных и значение емкости конденсатора. Виртуальный прибор является удобным инструментом для проектирования многоуровневых преобразователей и быстрой оценки емкости конденсаторов инверторов для исключения перенапряжений на силовых ключах.*

***Ключевые слова:** LabVIEW, виртуальный прибор, полупроводниковый преобразователь напряжения, модульный многоуровневый преобразователь электроэнергии, симметричная трехфазная нагрузка.*

Машинные методы проектирования позволяют быстро оценить требуемые свойства систем. Существует множество пакетов программ для решения подобных задач. Одной из удобных и наглядных является среда программирования *LabVIEW* [1].

При проектировании высоковольтных полупроводниковых преобразователей актуальными являются вопросы выбора оптимальных параметров пассивных элементов, оказывающих существенное влияние на массогабаритные и экономические показатели устройства. В имеющейся литературе вопросы разработки виртуальных приборов (ВП) для оценки оптимальных величин пассивных элементов высоковольтных преобразователей освещены недостаточно полно, поэтому данная задача является актуальной.

Объектом исследования является модульный многоуровневый преобразователь с многообмоточным трансформатором и последовательно соединенными силовыми блоками (модулями) на основе однофазных мостовых инверторов. Основными эле-

ментами модуля являются неуправляемый выпрямитель и однофазный мостовой инвертор напряжения. Последовательное включение модулей позволяет формировать требуемое выходное напряжение для одной фазы преобразователя. Трехфазные преобразователи содержат три цепочки последовательно включенных модулей. Каждый однофазный инвертор в таком преобразователе получает питание от гальванически изолированной вторичной обмотки трансформатора через выпрямитель.

Целью данной работы является разработка виртуального прибора для расчета напряжений и токов фаз преобразователя, также емкости входного конденсатора автономного инвертора напряжения.

Математическая модель виртуального прибора

Исходными данными являются: активная мощность преобразователя $P_n = 20$ МВт; линейное выходное напряжение преобразователя – $U_l = 10$ кВ; коэффициент мощности – $\cos \varphi = 0,87$; нагрузка – трехфазная активно-индуктивная, соединение ветвей «Звезда».

Активная мощность симметричной трехфазной нагрузки при соединении ветвей приемника «Звездой» равна [2]

$$P_n = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi ,$$

где $U_\phi = U_l / \sqrt{3}$ – действующее фазное напряжение нагрузки; U_l – действующее линейное напряжение; $I_\phi = I_l$ – действующие фазный и линейный токи нагрузки; φ – сдвиг по фазе между фазным напряжением и фазным током.

Отсюда получаем соотношение для определения действующего фазного тока нагрузки в виде

$$I_\phi = I_l = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi} . \quad (1)$$

Аналогично, для активной, реактивной и полной мощностей фазы симметричного трехфазного приемника имеем:

$$P_{n\phi} = P_n / 3 = U_\phi I_\phi \cos \varphi ; Q_{n\phi} = U_\phi I_\phi \sin \varphi ; S_{n\phi} = U_\phi I_\phi . \quad (2)$$

Полное сопротивление фазы трехфазного потребителя определяется как

$$z = U_\phi / I_\phi = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} , \quad (3)$$

Секция 4

где r – активное сопротивление фазы; ωL – индуктивное сопротивление фазы потребителя.

Отсюда при заданных r и ω индуктивность фазы трехфазной нагрузки равна

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{(U_{\phi}/I_{\phi})^2 - r^2}. \quad (4)$$

При нулевой начальной фазе напряжения и фазе тока $\varphi = \arccos(0,87)$ мгновенные значения основных гармоник напряжения и тока фазы преобразователя равны

$$u(t) = U_m \sin \omega t; \quad i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

где $U_m = \sqrt{2}U_{\phi}$; $I_m = \sqrt{2}I_{\phi}$ – амплитудные значения напряжения и тока фазы потребителя.

Мгновенная мощность на фазе потребителя равна

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t)i(t) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi - U_{\phi} I_{\phi} \cos(2\omega t - \varphi). \end{aligned} \quad (5)$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую $P_{\text{нф}} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$ и гармоническую составляющую $\tilde{p}(t) = U_{\phi} I_{\phi} \cos(2\omega t - \varphi)$, угловая частота которой в два раза больше угловой частоты напряжения и тока. Мгновенная мощность $p(t)$ положительна тогда, когда $u(t) > 0$ и $i(t) > 0$, а при противоположных знаках напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ она отрицательна. Когда мгновенная мощность положительна нагрузка потребляет энергию, а когда отрицательна - нагрузка возвращает энергию в источник питания инвертора. Это может привести к перенапряжениям на силовых ключах инвертора. Во избежание перенапряжений нужно устанавливать конденсаторы необходимой емкости.

Постоянная составляющая $P_{\text{нф}}$ мгновенной мощности $p(t)$ определяет совершаемую нагрузкой работу или передаваемую в единицу времени энергию, $P_{\text{нф}}$ конденсатором и катушкой индуктивности не потребляется. Переменная составляющая $\tilde{p}(t)$ мгновенной мощности $p(t)$ может быть представлена активной, реактивной и полной мощностью в виде

$$\tilde{p}(t) = S_{\text{нф}} \cos(2\omega t - \varphi) = P_{\text{нф}} \cos 2\omega t + Q_{\text{нф}} \sin 2\omega t. \quad (6)$$

Полная и реактивная мощности не определяют ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени. Реактивная мощность, потребляемая катушкой индуктивности, положительна, а потребляемая конденсатором отрицательна, т.е. соответствует положительной энергии, отдаваемой инвертором в источник питания. Так как для индуктивности $\varphi = \pi/2$, а для емкости $\varphi = -\pi/2$, то для обоих случаев получаем $\tilde{p}(t) = \mp S_{\text{нф}} \cos(2\omega t \mp \pi/2) = \mp S_{\text{нф}} \sin 2\omega t$. Здесь верхние знаки относятся к индуктивности, а нижние – к емкости. Происходит непрерывный обмен энергией между емкостью источника питания инвертора и индуктивностью нагрузки, соответственно между магнитным и электрическим полями.

Мгновенная мощность поступления энергии в емкость равна скорости прироста энергии электрического поля, т.е. $\tilde{p}(t) = d(Cu^2/2)/dt = dw_3(t)/dt$ [2]. Приращение мгновенной энергии электрического поля ΔW_3 за период работы преобразователя позволяет определить требуемую емкость конденсатора и исключить перенапряжения на силовых ключах инвертора.

Вначале находим мгновенную энергию электрической цепи преобразователя путем интегрирования выражения мгновенной мощности (6), в результате получаем

$$w(t) = \int \tilde{p}(t) dt = \frac{S_{\text{нф}}}{2\omega} \sin(2\omega t - \varphi) = \frac{P_{\text{нф}}}{2\omega} \sin 2\omega t - \frac{Q_{\text{нф}}}{2\omega} \cos 2\omega t. \quad (7)$$

Затем определяем приращение мгновенной энергии как разность между максимальным и минимальным значениями выражения (7). В общем случае мгновенная энергия $w(t)$ представляет собой функцию двух независимых переменных ωt и φ . В рассматриваемом случае сдвиг по фазе между фазным напряжением и фазным током φ задан. Это значительно упрощает аналитическое определение приращения мгновенной энергии ΔW .

Для определения точек экстремумов продифференцируем функцию (7) по переменной ωt и приравняем полученное выражение к нулю. В результате получим необходимое условие экстремума непрерывной функции в виде

Секция 4

$$\frac{\partial w(t)}{\partial \omega t} = S_{\text{нф}} \cos(2\omega t - \varphi) = P_{\text{нф}} \cos 2\omega t + Q_{\text{нф}} \sin 2\omega t = 0. \quad (8)$$

Условие (8) справедливо при $\cos 2\omega t = 0$ и $\sin 2\omega t = 0$. Отсюда корни уравнений равны: $\omega t = \pi/4 + \pi n/2$ и $\omega t = \pi n/2$ для всех $n = 0, 1, 2, \dots$

Приращение мгновенной энергии электрического поля ΔW_3 определяет второе слагаемое уравнения (7) при $\cos \varphi = 0$ ($\sin \varphi = 1$) и корнях $\omega t = \pi n/2$, $\forall n = 0, 1, 2, \dots$. Подставив их в (7), получим приращение мгновенной энергии электрического поля

$$\Delta W_3 = \frac{Q_{\text{нф}}}{2\omega} [\cos 0 - \cos \pi] = \frac{S_{\text{нф}}}{\omega}. \quad (9)$$

В многоуровневых преобразователях приращение мгновенной энергии электрического поля одного силового модуля равно

$$\Delta W_3 = \frac{1}{N} \frac{S_{\text{нф}}}{\omega}, \quad (10)$$

где N – количество силовых модулей преобразователя.

При изменении напряжения на входном конденсаторе инвертора от максимального U_{max} до минимального U_{min} диапазон изменения энергии электрического поля равен

$$\Delta W_3 = C(U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2)/2 = 2CU_{\text{cp}}(U_{\text{max}} - U_{\text{cp}}),$$

где $U_{\text{cp}} = (U_{\text{max}} + U_{\text{min}})/2$ – среднее значение напряжения на конденсаторе.

Отсюда требуемая емкость конденсатора равна

$$C = \frac{\Delta W_3}{2U_{\text{cp}}(KU_{\text{max}} - U_{\text{cp}})}, \quad (11)$$

где K – коэффициент запаса по напряжению.

Принимаем среднее значение напряжения на конденсаторе равным напряжению звена постоянного тока силового модуля, т.е., $U_{\text{cp}} = U_{dc}$. Тогда выражение (11) с учетом соотношения (10) принимает вид

$$C = \frac{S_{\text{нф}}}{2U_{dc}N\omega(KU_{\text{max}} - U_{dc})}. \quad (12)$$

При запуске ВП принято $N = 9$, $U_{dc} = 600$ В, $U_{\text{max}} = 800$ В, $K = 1,2$, $\omega = 100\pi$.

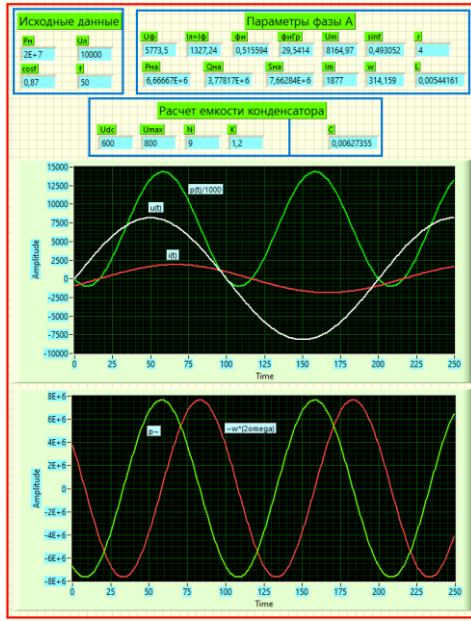
Разработка виртуального прибора. ВП в среде программирования *LabVIEW* состоит из лицевой панели, которая представляет собой окно с элементами управления и индикации, через которое пользователь взаимодействует с программой, и окна блок-диаграммы, в котором размещается программный код ВП.

На основе представленной выше математической модели разработан алгоритм и программа работы ВП. На рисунке *а* представлена лицевая панель, а на рисунке *б* – программный код ВП. Лицевая панель разбита на четыре окна, два из которых служат для задания исходных данных, а остальные – для отображения информации. На лицевой панели также размещены два осциллографа. На первом осциллографе приведены мгновенные значения основных гармоник напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ фазы, а также мгновенная мощность $p(t)$ на фазе потребителя согласно уравнению (5). Для удобства сопоставления кривых масштаб мгновенной мощности уменьшен в 1000 раз. На втором осциллографе приведены кривые переменной составляющей $\tilde{p}(t)$ мгновенной мощности (6) и мгновенной энергии $w(t)$ электрической цепи (7). Здесь масштаб мгновенной энергии увеличен в 2ω раз.

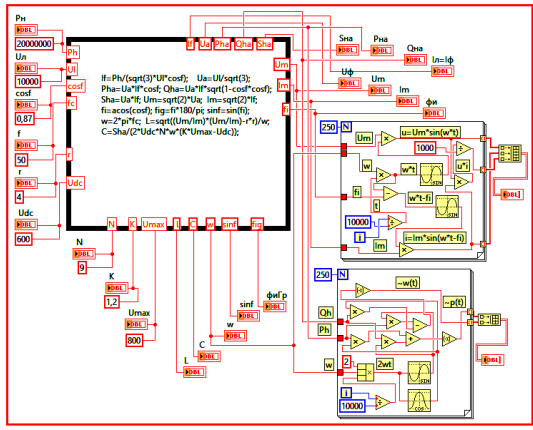
В левом верхнем окне лицевой панели ВП задаются исходные данные для расчета напряжений, токов, мощности и энергии электрической цепи. В правом верхнем окне лицевой панели отображаются параметры рассчитываемых кривых. В левой части нижнего окна задаются данные для расчета емкости конденсатора. В правой части нижнего окна лицевой панели отображается рассчитанное по уравнению (12) значение емкости конденсатора инвертора одного модуля.

Программный код ВП, представленный в окне блок-диаграммы (рисунок *б*), разработан с использованием функций базовой версии *LabVIEW* и состоит из трех окон. Левое верхнее окно представляет собой функцию «Узел формула». Узел формула является окном для ввода алгебраических формул непосредственно в блок-диаграмму. Здесь рассчитываются основные параметры исследуемых переменных и значение емкости конденсатора инвертора по формуле (12). Это позволяет значительно уменьшить размеры программного кода.

Секция 4



a



б

Виртуальный прибор

Два последних окна выполнены с использованием структур циклов с фиксированным числом итераций. Внутри структур

реализованы программные коды с использованием стандартных функций *LabVIEW*. Выходы структур через функцию «Создать массив» подключены к осциллографам. Программный код верхней структуры служит для расчета мгновенных значений напряжения, тока и мгновенной мощности фазы потребителя. Программный код нижней структуры осуществляет расчет переменной составляющей мгновенной мощности и мгновенной энергии.

Таким образом, разработанный виртуальный прибор, имеющий удобную лицевую панель, позволяет наглядно ввести исходные данные электрической цепи, рассчитать и отобразить на экране исследуемые переменные.

Выводы

1. Разработан виртуальный прибор для расчета токов и напряжений, мощности и энергии модульного многоуровневого преобразователя и емкости входного конденсатора инвертора силового модуля.

2. Удобная лицевая панель виртуального прибора позволяет наглядно вводит исходные данные для расчета и отображать на экране кривые исследуемых переменных и значение емкости конденсатора.

3. Виртуальный прибор является удобным инструментом для проектирования многоуровневых преобразователей и быстрой оценки емкости конденсаторов инверторов для исключения перенапряжений на силовых ключах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Трэвис Дж. LabVIEW для всех / Дж. Трэвис, Дж. Кринг.* - М.: ДМК Пресс, 2008. - 880 с.
2. Основы теории цепей. Учебник для вузов. / Г. В. Зевеке [и др.]. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.

Авторы:

Охоткин Григорий Петрович, см. стр. 86.

Малинин Григорий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 1996 году окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧувГУ им. И.Н. Ульянова. В 2000 году получил ученую степень кандидата технических наук. Диссертацию защитил по те-

матике исследования импульсных преобразователей постоянного напряжения. E-mail: malgrigb@mail.ru.

Лазарева Надежда Михайловна, см. стр. 353.

Селивестров Николай Валерьевич, руководитель департамента электроприводной техники ОАО «ВНИИР». Окончил физико-технический факультет Чувагу им. И.Н. Ульянова в 2003 году. E-mail: nselivestrov@vniir.ru.

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Качелаев О.В., Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

***Аннотация.** Актуальность работы обусловлена требованиями законодательства к прогнозированию электропотребления для решения задачи поддержания баланса мощностей между генерирующей стороной и потреблением электрической энергии. Полученная НС модель краткосрочного прогнозирования электропотребления учитывает факторы: времени, метеорологических условий, режима работы. Получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии наружной температуры, типу дня и т.д.*

***Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, прогнозирование электропотребления, набор факторов, надежность систем энергоснабжения.*

Введение

В электроэнергетических системах осуществляется непрерывное круглосуточное регулирование технологического режима работы объектов диспетчеризации по мощности, обеспечивающее [1]: поддержание частоты электрического тока в установленных пределах; поддержание потоков мощности в объектах электросетевого хозяйства, в пределах допустимых значений; изменение заданных режимов работы энергосистемы при изменении фактического электроэнергетического режима энергосистемы.

Синтез нейросети

В качестве выходных параметров выбраны показания отдельных счетчиков, а в качестве входных – наборы определяющих и влияющих параметров. Структура ИНС определялась опытным путем. Число промежуточных слоев равнялось одному. Функция активации нейрона – сигмоид. Для удобства выкладок, выразим порог активации через дополнительную синаптическую связь с весом w_0 и фиксированным входным сигналом $x_0 = 1$:

$$O_j = \varphi(v_j) = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i.$$

Для настройки весов нейронной сети используется алгоритм обучения с учителем, известный как алгоритм обратного распространения ошибки. Метод определения количества нейронов скрытого слоя рассмотрен в [7]. Итоговой отклик нейронной сети, который является почасовым прогнозом электропотребления формируется на основании выражения:

$$Y = \varphi(W_{mh} O_m),$$

где W_{mh} – матрица весовых коэффициентов между последним скрытым слоем m и выходным слоем h ; O_m – отклик последнего скрытого слоя m .

В качестве основных входных данных используется: – сам прогнозируемый параметр – величина потребляемой мощности; – набор определяющих параметров как основы для получения прогноза, с дополнительным учетом влияющих параметров – температура окружающей среды – 3 вход; – текущая дата, служит для уточнения месяца и дня недели при прогнозе – 4 вход, 5 вход был введен для определения рабочих и выходных дней недели.

Дополнительно был введен параметр «индекс дня», для определения рабочих или выходных дней недели. Так, например, рабочим будням соответствует индекс 1, для выходных – 0, для предпраздничных дней – 0.5, т.к. это не выходные, но рабочий день несколько сокращен. Это работает следующим образом: в будние дни величина потребляемой мощности держится в одном диапазоне, а в праздничные дни или выходные сеть может видеть некоторое снижение потребляемой мощности. Введение данных индексов позволяет сети понять, что в выходные или праздничные дни потребление несколько уменьшается.

Для определения входных переменных нейронной сети при решении задач прогнозирования нагрузки была использована модель, описывающая изменения во времени фактических значений электропотребления, которая в общем виде представляется нелинейной функцией:

$$W_t = f(W_{t-n}, T_{t-n}, N_t) + \varepsilon_t,$$

где W_t – фактическое электропотребление энергосистемы в момент времени t ; t – текущее время; W_{t-n} – предшествующие наблюдения электропотребления; T_{t-n} – предшествующие наблюдения температуры окружающей среды; n – индекс ретроспективы данных; N_t – тип дня недели (рабочий, выходной, праздничный); ε_t – случайная составляющая, представляющая ненаблюдаемые факторы, влияющие на электропотребление.

Оценка точности прогноза ИНС на тестовом множестве размерностью P оценивается по среднему абсолютная ошибка в процентах (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100,$$

где y_i – фактическое значение нагрузки, \hat{y}_i – результат прогноза, P – количество данных.

Были получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии, наружной температуры и типу дня. Данные были предварительно подготовлены – разделены на обучающее, контрольное и тестовое подмножества.

Разработка модели прогнозирования

При разработке модели прогнозирования, целесообразно сгруппировать дни не дели, схожие по ЭП. В работе [19] был предложен подход, позволяющий выделить следующие типы дней в неделе: рабочий день, выходной день, праздничный день.

Такой подход оправдан, поскольку характер ЭП по этим дням различается. Так, например, в рабочие дни ЭП в большей степени зависит от технологических процессов промышленных предприятий, планов выпуска продукции, графика рабочего времени, в то время как в выходные и праздничные дни боль-

ший вес имеют социальные явления, период светового дня и другие факторы. Предложенная математическая модель прогнозируемого объема электропотребления (ЭП) – это функция от следующих переменных:

$$V_2(t) = \{M, N, T_{cp}, t, h, V_1, T_n\},$$

где $V_2(t)$ – прогнозируемая величина объемов потребляемой электроэнергии; $V_1(t)$ – текущая величина объемов потребляемой электроэнергии; M – порядковый номер месяца в году; N – порядковый номер дня в месяце; T_{cp} – среднесуточная температура окружающего воздуха; h – флаг для рабочего или выходного дня (1 – рабочий, 0 – выходной); T_n – тариф на электроэнергию; t – часовой интервал времени. При создании обучающей выборки входные сигналы нейронной сети представляются параметрами t , $V1_{ээ}$, N , T_{cp} , n , h , а эталонные значения – параметром $V2_{ээ}$.

Результаты исследований

Рассмотрим пример помесечного прогнозирования электропотребления с применением ИНС. На рис. 1, 2 представлен месячный ряд почасовых значений потребляемой электрической энергии энергосистемы (счетчик АР-202) в весенний период, на котором видна суточная периодичность электропотребления и заметна характерная особенность месячного цикла – снижение потребления электрической энергии в выходные дни.

Прогнозирование электропотребления осуществлялось при длине интервала предыстории 30 суток, так как опытным путем было установлено, что для этих интервалов характерны меньшие ошибки прогнозных оценок. Выбор функции масштабирования зависит сугубо от начальных зависимостей в данных. Все входные параметры необходимо нормализовать на отрезке значений от 0 до 1. Для построения нейронной сети использовался встроенный функционал Matlab. Анализ данных показал, что форма графиков носит циклический характер, электропотребление обладает сезонностью. Одной из циклических составляющих графика потребления является суточный цикл. Вечерний максимум суточных графиков нагрузки выше утреннего. Выходные дни характеризуются более медленным нарастанием нагрузки в дневной части суток по сравнению с рабочими днями.

Секция 4

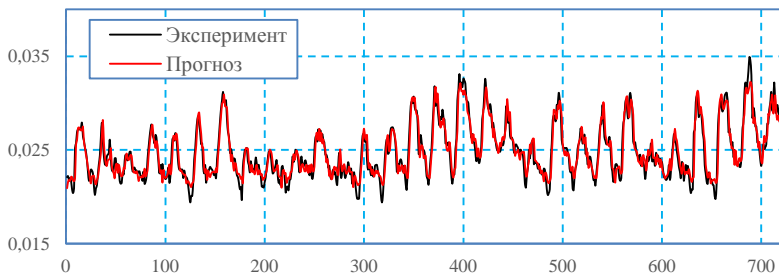


Рис. 1. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой активной мощности

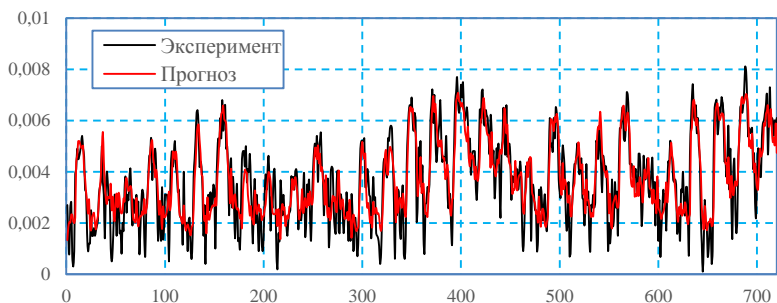


Рис. 2. Фактическое и прогнозируемые значения потребляемой реактивной мощности

Таблица

Погрешности прогнозирования

Погрешность, %			
Активная мощность (P)		Реактивная мощность (Q)	
Среднее значение	3.2	Среднее значение	12.3
Максимальное значение	17.1	Максимальное значение	21.4

Из анализа публикаций показал, что приемлемой является ошибка прогноза не более 5 %.

Выводы

Разработанная НС математическая модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных.

Получены прогнозные оценки электропотребления энергосистемы по данным потребляемой электроэнергии наружной температуры, типу дня и т.д. Для повышения точности прогнозирования необходимо увеличить базу данных, составляющих обучающую выборку (метеорологические условия, и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Об электроэнергетике: Федеральный закон РФ от 26.03.2003 № 35-ФЗ // Рос. газета. 2003. 1 апр. С. 1.

2. Планирование электроэнергетических режимов работы энергообъектов и энергосистем [Электронный ресурс] // Сайт АО «Системный оператор Единой энергетической системы». URL: http://so-ops.ru/index.php?id=regime_plan (14.06.2016)

3. Шарифуллин В.Н., Шарифуллина А.В. Нейросетевое прогнозирование потребления электроэнергии промышленным предприятием // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2012. № 2 (13). С. 6–11.

4. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Азаров Н.В., Огреничев А.В. Нейросетевой метод в задачах прогнозирования электропотребления в электроэнергетической системе. Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 1. С. 114-118.

5. Полуянович Н.К., Тибейко И.А. Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Южный Федеральный Университет, Инженерно-технологическая академия, Институт радиотехнических систем и управления, Кафедра электротехники и мехатроники. Таганрог, 2014.

6. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с.

Авторы:

Полуянович Николай Константинович, см. стр. 22.

Дубяго Марина Николаевна, см. стр. 22.

Качелаев Олег Вадимович, аспирант кафедры Техносферной безопасности и химии Южного федерального университета. Окончил обучение по программе магистратуры по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в Южном федеральном университете в 2023 году. E-mail: 22.olezhka@mail.ru.

О ПРИМЕНЕНИИ БИВАЛЕНТНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ «ВОЗДУХ-ВОДА» В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Козлова М.В., Румянцев А.С., Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

***Аннотация.** В данной работе представлены результаты исследования эффективности работы бивалентной системы теплоснабжения, функционирующей на базе теплового насоса «воздух-вода», предназначенной для покрытия нагрузок на систему отопления и горячего водоснабжения. Оценка эффективности выполнена для климатических условий Российской Федерации.*

***Ключевые слова:** бивалентная система, горячее водоснабжение, тепловой насос, отопительная нагрузка.*

Относительно низкий уровень газификации районов является одной из главных проблем российского топливно-энергетического комплекса. В качестве источников теплоснабжения в негазифицированных регионах применяются: котельные установки на твёрдом топливе, сжиженном газе, жидком топливе и электрические котлы.

Однако такие виды топливных источников имеют ряд недостатков [1]. Например, к основным недостаткам твёрдого топлива относятся высокая пожароопасность, относительно низкий КПД теплоисточников, необходимость периодического визуального контроля за процессом горения и наличие специального помещения. Чтобы поставить качественное современное оборудование для использования сжиженного газа, нужно крупное капиталовложение, а также существует высокая вероятность возникновения аварийной ситуации из-за низкой температуры воспламенения. Использование только электрического котла может быть экономически нецелесообразно в связи со стоимостью электроэнергии в некоторых регионах России.

В этой связи актуальным является исследование альтернативных способов теплоснабжения, например, бивалентных систем на основе теплового насоса. Такая система подразумевает

Секция 4

работу теплонасосной установки (ТНУ) в сочетании с другим нагревательным прибором (дополнительным источником). В качестве дополнительного источника в подобных системах в большинстве случаев используются электрические котлы, котельные установки на пропане. При работе бивалентной системы ТНУ полностью или частично покрывает нагрузку на систему отопления и горячего водоснабжения. В качестве низкопотенциального источника энергии рассматривается воздух, поскольку он легкодоступен, и его использование не требует дополнительных финансовых затрат.

Принципиальная схема работы бивалентной системы теплоснабжения с тепловым насосом представлена на рис. 1.

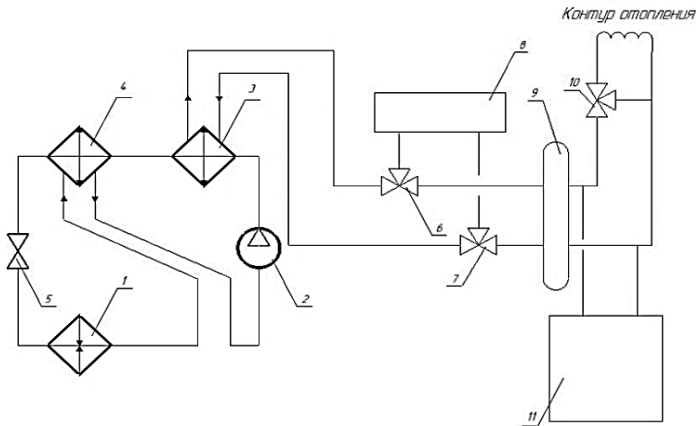


Рис. 1. Принципиальная схема бивалентной системы теплоснабжения с тепловым насосом

1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – регенеративный теплообменник; 5 – дроссельное устройство; 6, 7 – трехходовой клапан; 8 – дополнительный источник; 9 – термогидравлический распределитель; 10 – смесительный узел; 11 – бойлер

Для оценки эффективности работы теплового насоса в составе бивалентной системы теплоснабжения авторами был выполнен расчёт цикла с перегревом и переохлаждением рабочего агента в регенеративном теплообменном аппарате [2, с. 54], с

Секция 4

учетом того, что процесс сжатия является политропным. Основным показателем эффективной работы ТНУ принят коэффициент трансформации (COP).

Исследование эффективности бивалентной системы теплоснабжения осуществлялось для г. Архангельск, г. Москва, г. Астрахань, г. Екатеринбург и г. Владивосток. Для них были построены температурные графики 80/60, но поскольку система обеспечивает также нагрузку на горячее водоснабжение, то расчеты системы выполнены с учетом излома при 65 °С [3]. Характеристики систем, рассматриваемых в данной работе приведены в таблице.

Таблица

Характеристики бивалентной системы теплоснабжения

Параметр	Архангельск	Москва	Астрахань	Екатеринбург	Владивосток
Расчетная температура наружного воздуха $t_{нр}$, °С	-34	-26	-20	-32	-22
Длительность отопительного периода, ч	6722	5487	4777	6357	5418
Температура точки излома, °С	-18	-12	-8	-16	-9
Среднегодовой COP	3,1	4,3	6,6	3,5	5
Доля нагрузки, покрываемой ТНУ, от общей, %	86,6	91,7	87,6	85,2	71,5

На диаграммах, представленных на рис. 2, показано распределение нагрузки, покрываемой тепловым насосом и дополнительным источником на отопление и горячее водоснабжение. Доля электрической энергии, потребляемой тепловым насосом для рассматриваемых случаев, не превышает 28 % от вырабатываемой системой энергии.

На основе проведенных расчетов установлено, что тепловой насос покрывает более 70 % нагрузки системы теплоснабжения и эффективно работает большую часть года, что демонстрируют значения коэффициента трансформации.

Секция 4

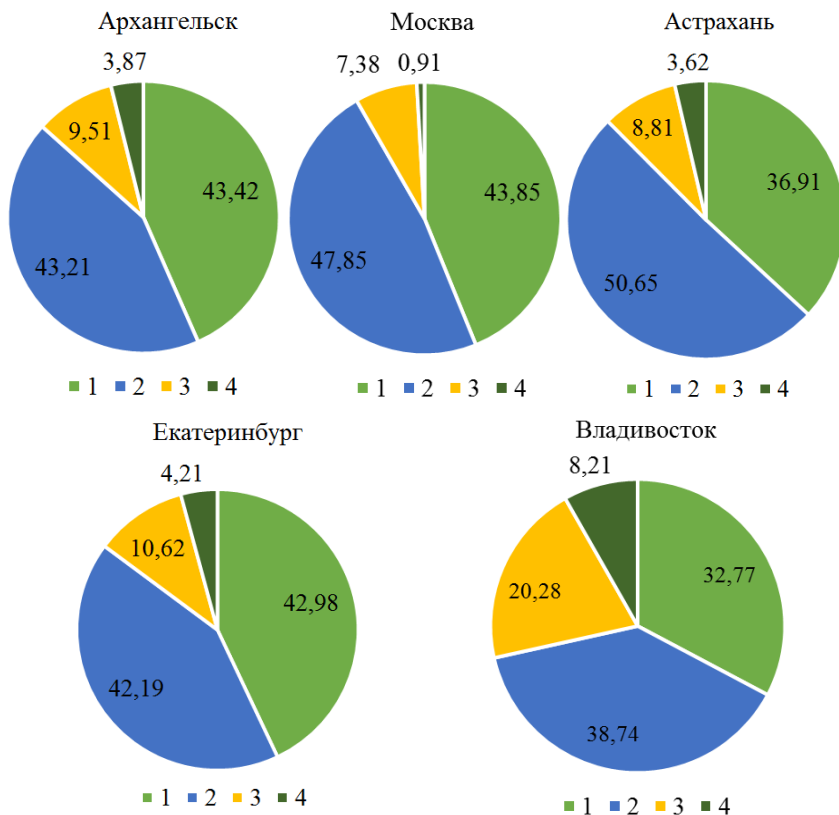


Рис. 2. Диаграмма распределения нагрузки теплового насоса и дополнительного источника на отопление и горячее водоснабжение
 1 – доля нагрузки, покрываемой ТНУ на отопление; 2 – доля нагрузки, покрываемой ТНУ на ГВС; 3 – доля нагрузки, покрываемой дополнительным источником на отопление; 4 – доля нагрузки, покрываемой дополнительным источником на ГВС

Выводы

Резюмируя всё вышеизложенное, можно сделать вывод, что применение бивалентной системы теплоснабжения, включающей в себя тепловой насос, для покрытия нагрузок на отопление и горячее водоснабжение целесообразно во всех городах, приведённых в качестве примера. Наиболее эффективным является использование таких систем в южных широтах в связи с благоприятными климатическими условиями, характерными им.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухарицин П.И. Альтернативные источники энергии // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8–2. С. 189.
2. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
3. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий СНиП 2.04.01-85. – М.: Стандартинформ, 2021. – 96 с.

Авторы:

Козлова Мария Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Теплоэнергетический факультет, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2018 – Высшее образование, бакалавриат, 2020 – Высшее образование, магистратура. В 2022 году – кандидат технических наук: «Повышение эффективности опреснительных установок гигроскопического типа».

E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com.

Румянцев Алексей Сергеевич, студент Теплоэнергетического факультета, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. E-mail: rumoal@yandex.ru.

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ КАМЕРА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ БПЛА

Чертановский А.Г., Васильева Л.Н., Портнов М.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В работе предложена мультиспектральная камера технического зрения беспилотного летательного аппарата. Преобразование видеосигнала в мультиспектральной камере технического зрения осуществляется в микроконтроллере, который работает с операционной системой «Linux».

Ключевые слова: БПЛА, дрон, техническое зрение, видео, тепловизор.

При решении гражданских и военных задач с помощью беспилотных летальных аппаратов мультиспектральное техническое зрение является наиболее актуальным, т.к. позволяет оценить обстановку вокруг беспилотного летального аппарата оператором удаленного управления в разных спектрах излучения [1].

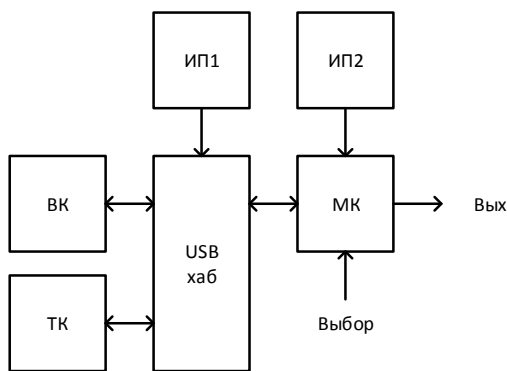
На данный момент есть два типа систем передачи видеосигналов от беспилотных летальных аппаратов к оператору: аналоговые и цифровые. Аналоговые системы имеют преимущество в условиях помех, т.к. позволяют получить изображение, хоть и с помехами, когда цифровые в таких ситуациях полностью становятся слепыми [2, 3].

Для мультиспектрального технического зрения требуется видеокамеры тепловизионного диапазона. Данные камеры с необходимыми характеристиками радиопромышленностью России практически не выпускаются или в недостаточных объемах. В условиях санкций зарубежные видеокамеры тепловизионного диапазона практически недоступны или стоят очень дорого.

Доступная видеокамера тепловизионного диапазона *InfiRay P2 Pro* с необходимыми характеристиками можно купить в Китае, однако эта видеокамера тепловизионного диапазона имеет цифровой видеовыход по шине *USB*. Для получения аналогового сигнала с этой видеокамеры требуется преобразователь видеосигнала. На данный момент вычислительная мощность цифровых микроконтроллеров стала такой большой, что в режиме

реального времени можно выполнять преобразование видеосигнала. На рисунке показана структурная схема мультиспектральной камеры технического зрения БПЛА.

На структурной схеме показаны следующие обозначения:



Структурная схема

ВК – видеокамера;
ТК – тепловизионная камера;
USB хаб – USB концентратор;
МК – микроконтроллер;
ИП1, ИП2 – источники питания.

Как видно из структурной схемы видеокамера и тепловизионная камера подключается к микроконтроллеру по шине *USB* через *USB* хаб. Микроконтроллер работает на операционной системе «*Linux*». В этой операционной системе запускается программа, которые получают видеосигнал с видеокамеры или тепловизионной камеры и показывают его на полный экран. Аналоговый композитный сигнал с микроконтроллера подается на радиопередатчик полетного контроллера. Для выбора видеокамеры или тепловизионной камеры для показа изображения используется цифровой вход микроконтроллера, на который поступает сигнал управления с полетного контроллера. В операционной системе работает программа, которая контролирует состояние этого входа и осуществляет выбор источника сигнала для отображения.

Выводы

Показан принцип преобразования цифрового сигнала с видео и тепловизионной камер с применением быстродействующего микроконтроллера с работающим на нем операционной системы «*Linux*» и программ для обработки и воспроизведения видеоизображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антти Суомалайнен. Беспилотники: автомобили, дроны, мультикоптеры. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 120 с.
2. Яценков В. С. Твой первый квадрокоптер: теория и практика. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 256 с.
3. Бейктал Дж. Конструируем роботов. Дроны. Руководство для начинающих / Дж. Бейктал; пер. с англ. Ф.Г. Хохлова. – 2-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2022. – 226 с.

Авторы:

Чертановский Алексей Григорьевич, см. стр. 86.

Васильева Лидия Николаевна, см. стр. 219.

Портнов Михаил Семенович, см. стр. 86.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ УСТАНОВОК ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОТ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Миргородская Е.Е., Лобычев А.А., Цвелев В.А., СГТУ
имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

***Аннотация.** Рассмотрена схема выпрямительного устройства для источника постоянного напряжения на основе ветрогенератора. Особенностью преобразователя является применения трех объединенных по выходу инверторов повышенной частоты с неявным звеном постоянного тока, нагруженных на неуправляемый выпрямитель. Представлены статические характеристики преобразователя, полученные при исследовании его математической модели, даны рекомендации по выбору диапазона частот регулирования.*

***Ключевые слова:** выпрямительные устройства, ветрогенератор, инвертор с неявным звеном постоянного тока, частота инвертирования, статические характеристики.*

Электроэнергия, генерируемая ветрогенераторами (ВГ) в микрогрид, должна быть преобразована средствами силовой электроники в энергию со стабильными, но управляемыми параметрами.

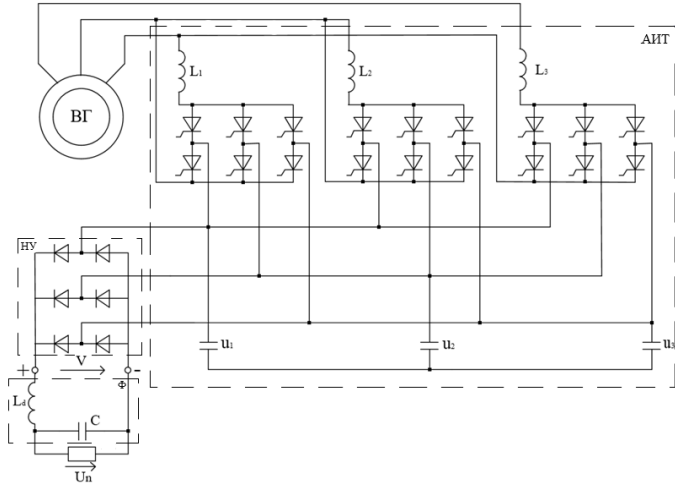
Необходимым этапом такого преобразования является выпрямление переменного тока, генерируемого ВГ, причем полученное при этом постоянное напряжение должно обладать требуемыми параметрами по стабильности его величины и наличию пульсаций.

В настоящее время в источниках питания на основе ВГ распространена система выпрямления по схеме «неуправляемый выпрямитель – импульсный преобразователь постоянного тока» (НУ – ИППТ). В качестве альтернативы этой системе может быть рассмотрен выпрямительный преобразователь на базе инвертора тока без явного звена постоянного тока (ИТ с НЗПТ) [1] и неуправляемого выпрямителя.

Принципиальная схема силовой части такого устройства показана на рисунке.

Особенности этой схемы заключаются в следующем. Во-первых, регулирование выходного напряжения U_n осуществляется за счет изменения частоты автономного инвертора тока (АИТ), которая, как известно, сильно влияет на коэффициент

передачи инвертора по напряжению [2]. Во-вторых, помимо управления величиной напряжения за счет регулирования частоты инвертирования в ИТ с НЗПТ возможно регулировать выходное напряжение фазовой задержкой включения инверторных мостов по тому же принципу, как это делается в управляемых выпрямителях за счет задержки включения вентилей.



Принципиальная схема силовой части системы выпрямления по схеме ИТ с НЗПТ

Преимущество ИТ с НЗПТ перед НУ – ИППТ заключается в использовании в них отечественных тиристоров вместо импортных высокочастотных транзисторов, применяемых в импульсных преобразователях, что немаловажно в условиях импортозамещения. Кроме того, потери энергии и высокочастотные помехи, создаваемые ИППТ при регулировании напряжения, превышают таковые, имеющие место в инверторе ИТ с НЗПТ.

Сравнение этих схем выпрямления, пригодных к использованию в случае, когда первичным источником является ВГ, позволяет сделать вывод, что целесообразным является постановка задачи их подробного исследования. Схема ИТ с НЗПТ практически не исследована и слабо описана в литературе по силовой электронике.

Математическая модель инвертора тока, приведенная в [3], с точки зрения задач настоящей работы имеет важный недоста-

Секция 4

ток. Она получена для линейной нагрузки активно-индуктивного характера. В нашем случае нагрузкой является неуправляемый выпрямитель, нагруженный на Г-образный LC-фильтр и, в простейшем случае, активную нагрузку.

Исследования ИТ с НЗПТ проведем численным методом на достаточно точной математической модели, учитывающей нестационарность и нелинейность изучаемого объекта.

Компьютерная программа, реализующая описанную математическую модель, позволяет исследовать преобразователь при его работе в статическом и динамическом режимах. Приведем результаты исследования преобразователя в статическом режиме. В этом режиме, считается, что входное напряжение и сопротивление нагрузки являются неизменными. Зависимости переменных состояния силовой схемы и нагрузки при изменении управляющей величины, которой в рассматриваемом случае является частота выходного напряжения инвертора f , называются статическими характеристиками. Соответствующие зависимости позволяют судить о поведении всех переменных состояния при регулировании выходного напряжения с помощью изменения частоты инвертирования.

В табл. 1-4 приведены некоторые статические характеристики преобразователя.

Таблица 1

Зависимость действующего значения выходного напряжения инвертора U от частоты инвертирования

$R, \text{ Ом}$ $f, \text{ Гц}$	0.90	0.70	0.50	0.30
400	195.5	160.8	133	108.1
450	215.9	175.7	140.5	112.5
500	236.5	191	148.2	117
550	257.1	206.6	158.4	121.4
600	277.9	222.4	168.8	126
650	298.7	238.2	179.6	130.5
700	319.5	254.2	190.5	135
750	340.1	270.2	201.5	139.6
800	360.6	286.1	212.6	144.2
850	381	302	223.7	149.2
900	401.2	317.8	234.8	155.3

Секция 4

Главной статической характеристикой следует считать зависимость выходного напряжения схемы выпрямления от частоты инвертора (табл. 2), т.е. регулировочную характеристику, позволяющую судить об эффективности регулирования.

Таблица 2
Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения V от частоты инвертирования

$f, \text{Гц}$ \ $R, \text{Ом}$	0.90	0.70	0.50	0.30
400	263.7	215.9	176.5	141.5
450	291.6	236.5	187.4	147.7
500	319.8	257.6	198.5	154
550	348	279	212.8	160.3
600	376.2	300.5	227.2	166.8
650	404.5	322.2	242.1	173.2
700	432.7	344	257	179.8
750	460.7	365.7	272.1	186.3
800	488.6	387.3	287.3	193
850	516.3	408.9	302.4	200.3
900	543.7	430.4	317.6	208.7

Таблица 3
Зависимость потребляемой мощности преобразователя от частоты инвертирования

$f, \text{Гц}$ \ $R, \text{Ом}$	0.90	0.70	0.50	0.30
400	78	67	63	67
450	95	81	71	73
500	115	96	79	80
550	137	113	91	86
600	160	131	104	94
650	186	151	119	101
700	213	172	134	109
750	242	195	150	117
800	273	220	168	126
850	306	245	187	135
900	341	273	206	147

Семейства статических характеристик преобразователя получены для следующих значений сопротивления нагрузки R 0.1 Ом, 0.3 Ом, 0.5 Ом, 0.7 Ом, 0.9 Ом и при следующих фиксированных значениях параметров силовой схемы: среднее значение напряжения на входе инвертора $U_d = 100$ В, емкость коммутирующих конденсаторов при включении конденсаторной батареи в звезду $C = 2000$ мкФ, индуктивность входных реакторов $L_d = 0.1$ мГн, активное сопротивление реакторов $R_d = 0.01$ Ом.

Таблица 4

Зависимость мощности нагрузки преобразователя от частоты инвертирования

R , Ом \ f , Гц	0.90	0.70	0.50	0.30
400	77	67	62	67
450	95	80	70	73
500	114	95	79	79
550	135	111	91	86
600	158	129	103	93
650	183	149	117	100
700	209	170	132	108
750	237	192	148	116
800	267	215	165	124
850	298	240	183	134
900	330	266	202	145

Выводы

Анализ регулировочной характеристики (табл. 4) позволяет сделать следующие выводы.

1. В диапазоне регулирования частоты от 400 до 900 Гц имеет место монотонно возрастающая зависимость выходного напряжения выпрямителя V от частоты f .

2. Зависимость выходного напряжения выпрямителя V от частоты близка к линейной.

3. Статический коэффициент усиления в диапазоне сопротивления нагрузки от 0.9 Ом до 0.5 Ом меняется от 2.6 до 1.8. При малых значениях сопротивления нагрузки (при увеличении нагрузки в 3 и более раз) коэффициент усиления падает до 1.5-1.2.

4. Выбранный диапазон регулирования частот может быть рекомендован при питании активной нагрузки с максимальной мощностью 3.5-2.0 кВт/В.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Никитенко Г.В.* Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев. – Ставрополь: АРГУС, 2008. – 139 с.

2. *Кантер И.И.* Теория работы бестрансформаторного преобразователя частоты с неявным звеном постоянного тока / И.И. Кантер, Н.П. Митяшин, И.И. Артюхов // Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов: Межвуз. науч. сб. – Уфа, 1977. – № 7. – С. 82–89.

3. *Руденко В.С.* Основы преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – М.: Высшая школа, 1980. – 424 с.

Авторы:

Миргородская Екатерина Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Окончила факультет электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета в 2007 году. Ученую степень присвоена в 2011 году по научной специальности 05.09.12 «Силовая электроника». E-mail: tee85@inbox.ru.

Лобычев Андрей Александрович, магистрант кафедры «Системотехника и управление в технических системах», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Окончил институт электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в 2023 году. E-mail: andrei.lobychev@yandex.ru.

Цвелев Владислав Александрович, магистрант кафедры «Системотехника и управление в технических системах», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Окончил институт электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в 2023 году. E-mail: zweleww@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КОНДЕНСАТОРОВ В СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Шмигирилов Ю.Г., Дружинская О.И., Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Димитровград, Россия

***Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований теплового состояния электротермических конденсаторов для силовых преобразователей индукционных нагревательных установок. Определены температурные поля и локальные области максимальной температуры диэлектрика.*

***Ключевые слова:** конденсатор, температурное поле, индукционная нагревательная установка.*

При разработке электрических конденсаторов преследуется цель снизить их габариты и массу на единицу мощности и повысить надежность изделия, что в свою очередь связано с проблемой улучшения тепловых характеристик разрабатываемых конденсаторов.

Расчеты теплового поля конденсатора базируются на знании величины и характера распределения мощности тепловыделения и коэффициентов теплопроводности. В зависимости от принимаемых допущений задача решается либо аналитически [1, 2], либо численными методами [3-5]. Получившие в широком распространение численное моделирование тепловых режимов в технических системах обладают достаточно высокой точностью расчетов, если удастся правильно определить пространственное распределение источников тепла, рассчитать их мощность и учесть влияние охлаждающей среды.

Конструкция электротермического конденсатора повышенной частоты для силовых преобразователей представляет сложную несимметричную трехмерную систему, поэтому тепловые расчеты по известным двумерным математическим моделям стационарных тепловых процессов [2] не позволяют учесть асимметрию конструкции конденсатора, источников тепла и системы теплоотвода.

Во многих практических случаях [6, 7], как в настоящей работе, оценку теплового состояния конденсаторов в разных режимах электрического и теплового нагружения проводится экспериментальным путем.

Цель проведенных исследований – анализ реального распределения температуры в конструктивных элементах электротермических конденсаторов типа ЭЭПВ, оценка вклада электромагнитных процессов в мощность тепловых потерь и разработка рекомендаций по улучшению тепловых характеристик вновь разрабатываемых конденсаторов.

Отечественные электротермические конденсаторы ЭЭПВ с частотой до 10кГц выполняются из совокупности секций с выведенной фольгой электродов. В качестве диэлектрика используется полипропиленовая пленка, пропитанная синтетической диэлектрической жидкостью. Из секций формируются группы ёмкостных элементов конденсатора, позволяющих изменять его ёмкость. На рис. 1 приведена электрическая схема соединений групп секций в пакете.

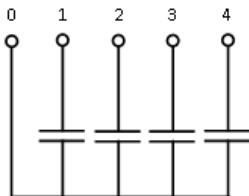


Рис. 1. Электрическая схема соединения групп секций в пакете

Для отвода тепла, выделяемого в объеме диэлектрика и токоведущих частях, одна торцевая поверхность пакета с выступающими краями электродов отдельных секций покрывается слоем припоя (шоопируется). К ней напаивается система водяного охлаждения, представляющая змеевик из медной трубки. Данная трубка одновременно служит для токоподвода к секциям конденсатора (общий электрод «0» на рис. 1).

Описание экспериментальной установки для изучения тепловых режимов электротермических конденсаторов и макетов (рис. 2) приведено в [7]. Основными ее элементами являются: управляе-

Секция 4

мый преобразователь частоты (UF), индуктивность для подстройки соответствующих режимов (L); система водяного охлаждения исследуемых конденсаторов (BO, H); измерительная система.

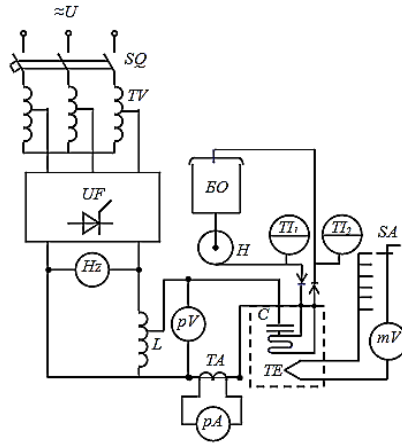


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
 TV – трехфазный автотрансформатор; UF – управляемый преобразователь частоты; L – катушка индуктивности; C – испытываемый конденсатор; TE – термоэлектрические преобразователи (18 термопар); SA – многопозиционный переключатель; TA – трансформатор тока; BO – бак с водой; H – насос; TI_1, TI_2 – датчики температуры воды на входе

При проведении исследований экспериментальные результаты сопоставлялись с результатами расчетов мощности потерь по инженерным методикам [1, 2]. В частности, мощность электрических потерь определялась по формулам:

– в обкладках

$$P_o = \frac{2}{3} \frac{\rho_{\phi} l_{\phi}}{b_{\phi} d_{\phi}} I^2; \quad (1)$$

– в выводах и соединительных шинах

$$P_b = r k_n I^2, \quad (2)$$

где ρ_{ϕ} – удельное электрическое сопротивление фольги; $l_{\phi}, b_{\phi}, d_{\phi}$ – длина, ширина, толщина обкладки, соответственно; r – сопротивление проводника; k_n – коэффициент поверхностного эффекта.

Мощность диэлектрических потерь

$$P_d = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

где C – емкость конденсатора или группы секций; ϵ_r – диэлектрическую проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь диэлектрика.

Мощность теплоотвода через обкладки, соединенные с охлаждающей системой

$$P_{\text{то}} = \rho_0 c L (\Theta_{\text{вых}} - \Theta_{\text{вх}}),$$

где ρ_0 – плотность охлаждающей жидкости; c – удельная теплоемкость охлаждающей жидкости; L – расход охлаждающей жидкости

Исследование тепловых режимов и температурных полей осуществлялось на макетах и конденсаторах типа ЭЭПВ. При их изготовлении в секциях пакета, на его поверхности и на корпусе конденсатора устанавливались миниатюрные термодатчики.

В процессе экспериментальных исследований варьировались: напряжение U , частота напряжения f , условия теплоотвода. Измерялись ток I , напряжение, активная мощность P , частота, напряжение термодатчиков и температура окружающей среды (температура холодного спая).

Исследования проводились в следующих режимах:

при отключенном водяном охлаждении в кратковременном режиме, чтобы температура изоляции не превысила предельно допустимых значений;

в номинальном установившемся режиме с принудительным водяным охлаждением секций конденсатора, согласно технических условий эксплуатации;

в номинальном установившемся режиме с принудительным водяным охлаждением секций конденсаторов и токоподводящих шин.

На рис. 3 приведены характерные картины температурного поля в среднем сечении пакета конденсатора ЭЭПВ-008-10 для перечисленных режимов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Область интенсивного тепловыделения и максимальной температуры при отсутствии принудительного охлаждения располагается в зоне трубок змеевика охлаждения, через которые

Секция 4

осуществляется общий токоподвод (рис. 3, *a*). Система водяного охлаждения и шоопированная торцевая часть пакета являются областью добавочных потерь, обусловленных вихревыми токами. Распределение температуры в пакете несколько противоречит данным, приведенным в [2], где констатируется, что точка максимальной температуры должна находиться посередине широкой стороны пакета на расстоянии около $2/3$ его высоты, считая от основания.

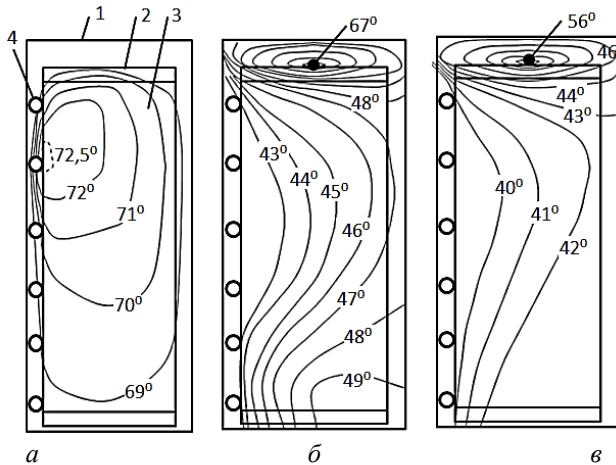


Рис. 3. Температурные поля в поперечном сечении конденсатора: *a* – при отсутствии водяного охлаждения; *б* – в номинальном режиме с принудительным водяным охлаждением секций конденсатора; *в* – с принудительным водяным охлаждением токоведущих шин соединения конденсаторов (1 – корпус конденсатора, 2 – корпусная изоляция, 3 – пакет конденсаторных секций, 4 – змеевик водяного охлаждения)

2. В номинальном установившемся режиме с принудительным водяным охлаждением секций конденсатора точка максимальной температуры внутри конденсатора находится в верхней части пакета в области межсекционных соединительных проводников (рис. 3, *б*). Это обусловлено не только мощностью тепловыделения, определяемой совокупностью электрических и диэлектрических потерь согласно (1), (2), (3), но и потерями

мощности от вихревых токов в крышке, в стержнях, скобе контактных выводов.

Кроме того, мощность тепловыделения в зоне контактного соединения токоподводящей шины со скобой общего вывода, зависит от переходного сопротивления контакта R_n , которое в свою очередь, определяется электрическими и механическими свойствами материалов, находящихся в контакте, силы сжатия в контакте и температуры [8]

$$R_n = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F_k}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \Theta_k \right),$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление металла при температуре контактной зоны Θ_k ; H – микротвердость поверхностных слоев металла при температуре зоны контакта; F_k – сила нажатия в контактах; α – температурный коэффициент сопротивления.

Взаимозависимость мощности тепловыделения P_k , температуры контакта Θ_k и переходного сопротивления контакта R_n приводит при работе конденсатора к спонтанному, неуправляемому нарастанию температуры в зоне контакта и существенно изменению теплового состояния конденсатора.

3. Для снижения температуры контактного соединения, уменьшения и стабилизации контактного сопротивления целесообразно применение принудительного водяного охлаждения токоведущих шин соединения конденсаторов (рис. 3, в). Данное техническое решение приводит не только к снижению контактного сопротивления (как следствие, к уменьшению мощности тепловых потерь в 2,5-3 раза в зоне контакта), но и к снижению температуры по всему объему конденсатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берзан, В.П. Справочник по электрическим конденсаторам. Общие сведения, выбор и применение / В.П. Берзан [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 311 с.
2. Кучинский, Г.С. Силовые электрические конденсаторы / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
3. El-Husseini M. Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors / M. El-Husseini [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2002. – Vol. 38. – № 3. – P. 713–718.

4. *Мадера, А.Г.* Моделирование трехмерных температурных полей в электронных модулях / А.Г. Мадера, П.И. Кандалов // Программные продукты и системы. 2010. – № 2. – С. 29-33.

5. *Зализный, Д. И.* Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора / Д. И. Зализный [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 301–312.

6. *Дмитришин, А.Я.* Исследование тепловых режимов работы высоковольтных импульсных конденсаторов для погружных электро-разрядных комплексов / А.Я. Дмитришин [и др.] // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харьков: НТУ «ХП», 2012. – № 52 (958). – С. 71–76.

7. *Шмигирилов, Ю.Г.* Особенности тепловых процессов в силовых конденсаторах для индукционных нагревательных установок // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. – 2014. – № 2 (4). – С. 46–51.

8. *Адоньев, Н.М.* Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовоточных электрических аппаратов / Н.М. Адоньев [и др.]; под ред. В.В. Афанасьева. – Л. Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.

Авторы:

Шмигирилов Юрий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей и медицинской физики Димитровградского инженерно-технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета. Окончил факультет автоматики и электромеханики Томского политехнического института в 1971 году. Ученая степень получена в 1978 году, тематика защиты «Разработка и исследование однофазного ударного генератора для электрогидравлического возбуждения сейсмических колебаний». E-mail: shug555@mail.ru.

Дружинская Ольга Игоревна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общей и медицинской физики Димитровградского инженерно-технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета. Окончила физико-технический факультет Ульяновского политехнического института в 1996 году. Ученая степень получена в 2007 году по теме «Разработка автоматизированных методов построения заправочных рисунков тканей комбинированных переплетений». E-mail: drol74@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ОБЪЕМНЫМ СВЕРХПРОВОДНИКОМ И КАТУШКОЙ С ТОКОМ

Курбатова Е.П., Кущенко Е.А., Национальный исследовательский университет, г. Москва, Россия

Сысоев М.А., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

***Аннотация.** В статье представлены результаты теоретического и экспериментального исследования силовых взаимодействий между объемным высокотемпературным сверхпроводником и катушкой с током в стационарном режиме.*

***Ключевые слова:** магнитный подвес, ВТСП, сверхпроводник.*

Объемные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) находят применение в бесконтактных магнитных подвесах [1,2]. По принципу действия ВТСП подвесы являются электродинамическими подшипниками, принцип которых основан на взаимодействии индуцированных токов в проводящем элементе и постоянных магнитов. Благодаря нулевому сопротивлению, индуцированные токи в сверхпроводнике практически не затухают и достигают высоких значений.

Обычно в ВТСП подвесах используются постоянные магниты, то есть стационарные источники поля. Поэтому они являются неуправляемыми, что ограничивает сферы их применения. Для возможности регулирования характеристик ВТСП подвеса возможно использование управляемого источника поля – электромагнита. Для эффективной конструкции необходимо использование двух источников поля:

неуправляемого (постоянного магнита) для создания основной составляющей электромагнитной силы;

управляемого (электромагнита) для создания регулирования электромагнитной силы.

Для изучения особенностей взаимодействия сверхпроводников с полем электромагнита выполнено исследование силовых взаимодействий между ВТСП и катушкой с током в стационарном режиме.

Секция 4

нарном режиме в двух режимах охлаждения – в магнитном поле (FC) и без поля (ZFC).

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований подготовлена лабораторная установка, позволяющая измерять силу, действующую на образец ВТСП материала, при воздействии магнитного поля электромагнита (рис. 1). Она состоит из весов, на которых устанавливается кювета для жидкого азота, внутри которой закрепляется ВТСП образец в виде диска. ВТСП крепится с помощью алюминиевой конструкции. Для создания регулируемого магнитного поля используется цилиндрическая катушка, намотанная на немагнитное основание с помощью медного провода. Катушка закрепляется над ВТСП образцом таким образом, чтобы их оси совпадали. Вертикальное расстояние (зазор) между ВТСП образцом и катушкой регулируется с помощью подвижного штока, на котором закреплена катушка. Катушка подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения, при этом ток контролируется с помощью амперметра. Сила измеряется с помощью весов.

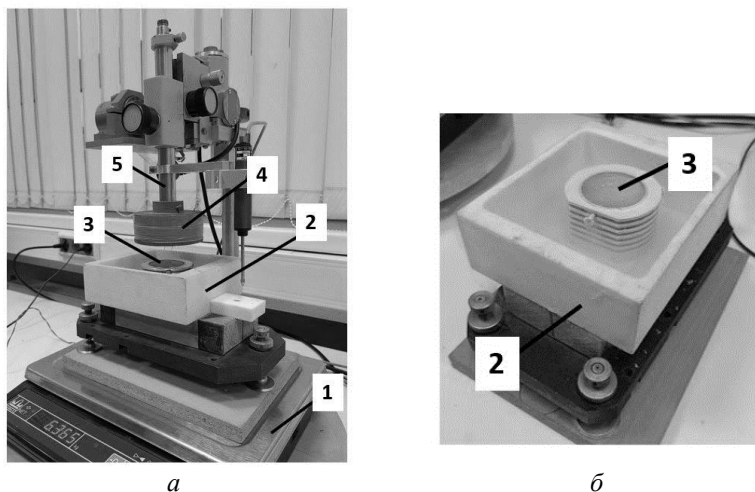


Рис. 1. Лабораторная установка: *а* – общий вид;

б – кювета с ВТСП образцом;

1 – весы; 2 – кювета; 3 – ВТСП; 4 – катушка; 5 – подвижный шток

Исследования проводились для двух режимов охлаждения сверхпроводника: в нулевом магнитном поле (ZFC) и во внешнем магнитном поле (FC). В ZFC режиме катушка с помощью штока устанавливалась на минимальном зазоре от сверхпроводника (0.2 мм), при нулевом токе в катушке с помощью жидкого азота сверхпроводник охлаждался в течение 10 минут. После охлаждения и перехода сверхпроводящее состояние на катушку подавалось напряжение. Путем регулирования источника ток в катушке изменялся от 0 до 3 А и до 0, после чего изменялась полярность и изменение тока повторялось для обратного знака от 0 до -3 А до 0.

Аналогично проводились испытания для FC режима. В этом случае ВТСП образец охлаждался при минимальном зазоре и включенной катушке (ток 2 А). После охлаждения в течение 10 минут измерялась характеристика силы при варьировании тока в катушке от 2 А до -2 А и обратно.

В результате экспериментов были получены зависимости силы, действующей на ВТСП образец от тока в катушке. Измерения в каждом режиме проводились по три раза, при этом результаты показали повторяемость – то есть гистерезиса силы, вызванного перезахватом поля, не наблюдалось, что связано с небольшим значением магнитного поля, создаваемого катушкой.

Моделирование

Для проведенных экспериментов выполнены расчеты с целью верификации используемых методик и моделей при моделировании свойств ВТСП материала в нестационарных полях. Расчет проводился в отечественном программном обеспечении для численного анализа трехмерных электромагнитных полей EasyMag3D, основанном на методе пространственных интегральных уравнений.

Модель для расчета состоит из ВТСП диска и катушки с током, представляющей собой кольцо с заданной однородной плотностью тока (рис.2). Как и в эксперименте расчет зависимости проводился для двух режимов – ZFC и FC.

Секция 4

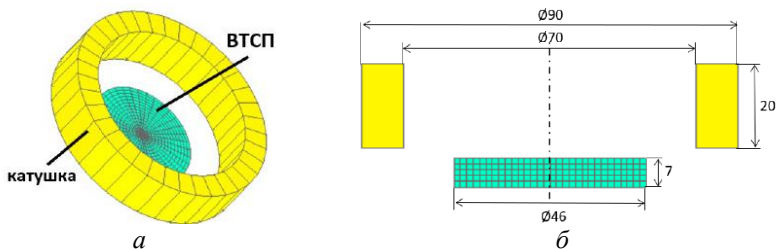


Рис. 2. Модель для расчета: *a* – общий вид; *б* – размеры

Для моделирования сверхпроводника использовалась модель свойств на основе намагниченности [3], суть которой состоит в описании сверхпроводника с помощью зависимости $M(H)$. До достижения критической намагниченности ВТСП материал аналогичен диамагнетику ($dM / dH = -1$) и находится на линейной части зависимости, в случае достижения критического значения происходит переход на характеристику $M_c(H)$.

Расчетные характеристики сопоставлены с результатами эксперимента и показали хорошую сходимость (рис. 3). На форму характеристик влияет режим охлаждения ВТСП образца. В ZFC режиме индуцированные в сверхпроводнике токи полностью вытесняют магнитное поле, независимо от его направления, что проявляется в симметрично форме зависимости. В FC режиме поддерживается поле при 2 А тока в катушке и сила меняет направление при изменении знака тока.

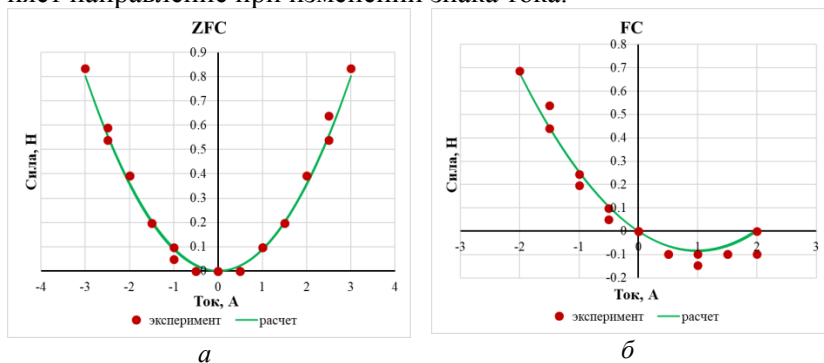


Рис. 3. Сопоставление результатов расчета и экспериментальных измерений: *a* – ZFC режим; *б* – FC режим

Выводы

В работе исследованы силовые характеристики при взаимодействии ВТСП образца с управляемым полем электромагнита. На данном этапе измерялся стационарный режим. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали возможность управления электромагнитной силой за счет изменения тока и особенности силовых характеристик при охлаждении в поле и без поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Werfel F. N.* Technical Progress in HTS Magnetic Bulk Application Development / Werfel F. N., Floegel-Delor, U., Riedel, T., Rothfeld, R., Schirrmeister, P., Wippich, D., Koenig, R. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015. – 25(3). – 3600304.

2. *Mukoyama S.* Development of Superconducting Magnetic Bearing for 300 kW Flywheel Energy Storage System / S. Mukoyama, K. Nakao, H. Sakamoto, T. Matsuoka, K. Nagashima, M. Ogata, T. Yamashita, Y. Miyazaki, K. Miyazaki, T. Maeda, H. Shimizu. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017. – 27(4). – 3600804.

3. *Kurbatova E.* Equivalent Models of Critical Current and Magnetization for Calculating the Magnetic Field in Simply Connected Structures Made of HTS Bulk and HTS Tape / E. Kurbatova, Kurbatov. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022. – 32(4). – 4900205.

Авторы:

Курбатова Екатерина Павловна, см. стр. 163.

Кущенко Егор Александрович, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ». Окончил факультет электротехники (ИЭТ) НИУ «МЭИ» в 2020 году.

E-mail: kushchenkoYA@gmail.com.

Сысоев Михаил Алексеевич, заведующий лабораторией, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. В 2010 году окончил Приборостроительный университет МГТУ им. Баумана. E-mail: ujjkolp@bk.ru.

V. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРО- ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В ЖИДКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЕ

Михадаров Д.Г., Ильгачёв А.Н., Васильев И.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Рассмотрены математические модели растекания тока в жидкой металлической ванне дуговой печи. Показана возможность перехода от трехмерной задачи к плоскопараллельной при моделировании электрического поля растекания тока по ванне жидкого металла. Приводятся результаты моделирования растекания тока без учета отклонения и с отклонением столба электрической дуги.*

***Ключевые слова:** дуговая печь, моделирование, жидкая металлическая ванна, электродинамика, поле, распределение тока.*

Дуговые печи постоянного тока всё большее применение находят в небольших литейных производствах, в том числе для переплава лома алюминия [1].

Важным является исследование характера распределения тока в жидкой металлической ванне (ЖМВ) печи, который определяется электрическими параметрами дуги (сила тока и мощность дуги), геометрическими размерами и положением столба дуги, материалом футеровки ванны.

Ток, протекающий в элементах короткой сети и в электрической дуге, вызывает электродинамические явления, которые приводят, в свою очередь, к возникновению трёх эффектов: электромагнитного дутья, «мениска» и сжатия столба дуги. Значения эффектов подробно описаны в работах [2-4].

В дуговой печи для переплава лома алюминия, спроектированной на кафедре электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств [5], эффект мениска будет не

значительным, и не сильно повлияет на характер распределения тока в ЖМВ. В тоже время будет присутствовать эффект электромагнитного дутья. По расчётам отклонение столба дуги может составлять более 3 мм. Ожидается, что это отклонение приведёт к неравномерному распределению тока в ЖМВ.

В лабораторной дуговой печи в качестве футеровки используется токопроводящий графитовый тигель, к которому присоединяется подовый электрод.

В [6] приведены результаты аналитического моделирования растекания тока в ванне жидкого металла дуговой печи. В данной работе для исследования используется программа для инженерного моделирования ELCUT.

При моделировании приняты следующие исходные данные:

- глубина жидкой металлической ванны – 15 см;
- диаметр жидкой металлической ванны – 25 см;
- диаметр столба дуги – 3 см;
- длина дуги – 2 см;
- отклонение столба дуги – 0,3 см;
- ток дуги – 1 кА.

Геометрия тигля и ЖМВ при моделировании поля растекания тока без учета отклонения столба дуги показана на рис. 2, а.

При протекании тока на участке «дуга – ЖМВ» часть энергии выделяется в электрической дуге, другая часть – в ванне жидкого металла.

В жидкой ванне алюминия дуговой печи постоянного тока отсутствует явление поверхностного эффекта. Поэтому распределение тока в ЖМВ описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta\varphi = 0.$$

где φ – потенциал электромагнитного поля.

Если не учитывать отклонение дуги от геометрической оси печи, то задача будет осесимметричной и уравнение Лапласа можно записать в цилиндрических координатах:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = 0.$$

где r, z, θ – цилиндрические координаты.

Секция 5

При отклонении столба дуги от оси электрическое поле в ванне жидкого металла, расположенного в цилиндрическом тигле, является трехмерным.

Для упрощения процесса моделирования трехмерного поля с учётом влияния отклонения столба осуществлялось решение плоской задачи в декартовой системе координат. Уравнение Лапласа в этом случае

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0,$$

где x, y – декартовы координаты.

Для оценки возможности такого перехода был произведён сравнительный анализ характеристик электрического поля в ЖМВ без учета отклонения дуги в цилиндрической и декартовой системах координат.

Геометрия ванны моделей для случаев осесимметричной и плоской задачи показаны на рис. 1 б, в.

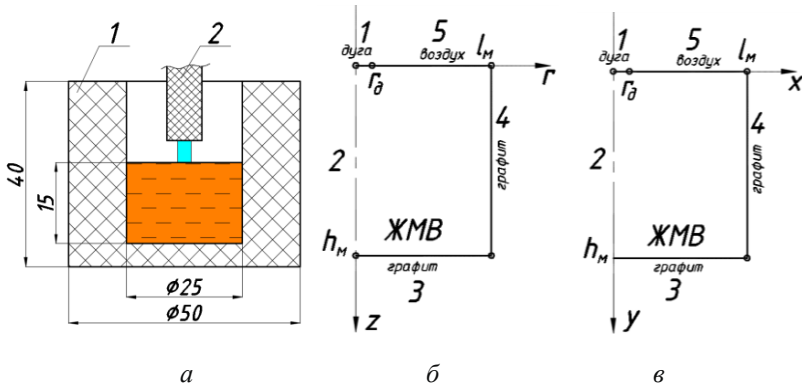


Рис. 1. Геометрические размеры тигля и ванны (а), модель ванны в цилиндрической (б) и декартовой системе координат (в):

1 – графитовый тигель, 2 – графитовый электрод, 3 – электрическая дуга, 4 – жидкая металлическая ванна

Как видно из рис. 2, качественно картины распределения потенциала и векторов плотности тока по объему ванны для осесимметричной и плоской задач примерно одинаковы.

Секция 5

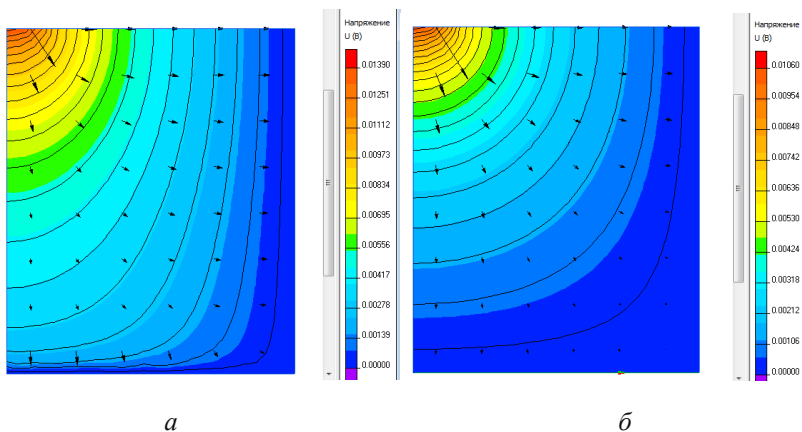


Рис. 2. Распределение потенциала и векторов плотности тока электрического поля ванны жидкого алюминия для осесимметричной (а) и плоской модели (б) печи

Распределение плотности тока по верхней, нижней и боковой поверхностям ЖМВ имеют примерно одинаковые количественные и качественные характеристики. Для примера на рис. 3 показано распределение плотности тока на верхней границе ЖМВ.

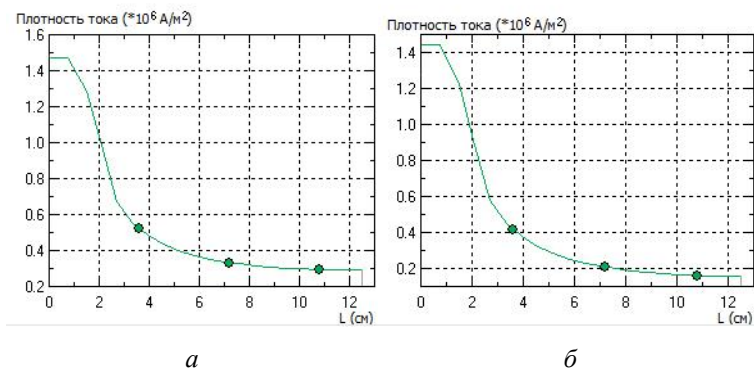


Рис. 3. Распределение плотности тока на верхней границе ванны жидкого алюминия для осесимметричной (а) и плоской модели (б)

Также были рассчитаны интегральные мощности в четырех зонах ЖМВ, обозначенных цифрами от I до IV (рис. 5).

Секция 5

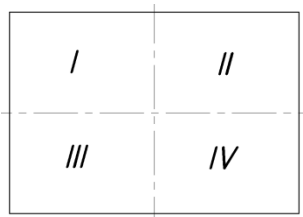


Рис. 4. Деление ванны жидкого алюминия на 4 зоны

Результаты сравнения интегральных мощностей (таблица) также показывают незначительность отличия этих характеристик при замене системы координат.

Таблица
Относительные интегральные мощности, выделяющиеся в зонах ЖМВ

Система координат	Номер зоны			
	I	II	III	IV
Цилиндрическая	0,66	0,26	0,05	0,05
Декартовая	0,76	0,13	0,07	0,02

Следовательно, плоскопараллельная модель может быть использована для исследования влияния отклонения дуги на характеристики поля растекания тока по ЖМВ.

На рис. 5, *а*, *б* приведены картины распределения потенциала и векторов плотности токов электрического поля в ЖМВ для случаев отклонения дуги на 7 и 20 мм.

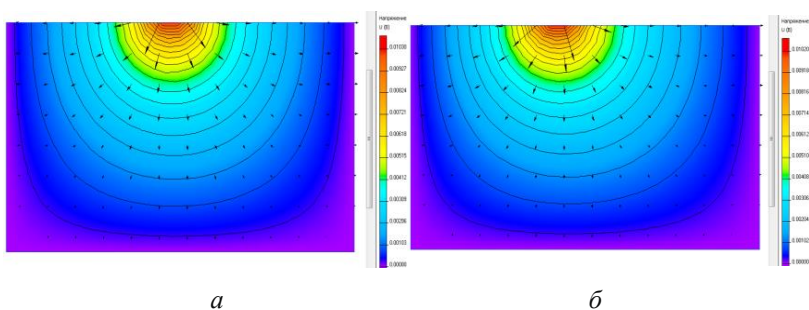


Рис. 5. Распределение потенциала и векторное поле плотности тока электрического поля ЖМВ для отклонения дуги 7мм (*а*) и 20 мм (*б*)

Анализ полученных данных показывает, что отклонение дуги приводит к изменению характеристик электрического поля растекания тока в ванне жидкого металла.

Отклонение дуги влево от оси печи вызывает увеличение плотности тока (соответственно удельной объемной мощности) с левой стороны и уменьшение с правой стороны. Это приводит к неодинаковым тепловым условиям на участках внутренней поверхности тигля. Происходит увеличение температурного режима на внутренней поверхности тигля слева и соответственно снижение справа.

Для количественной оценки изменения параметров теплового режима ванны жидкого металла требуется решение тепловой задачи.

Выводы

1. Обоснован переход от осесимметричной задачи к плоскопараллельной путем сравнения полученных результатов решения обоих типов задач.

2. Проведено моделирование распределения тока в жидкой металлической ванне для случаев без учета отклонения и с отклонением столба дуги.

3. Анализ полученных данных показывает, что отклонение дуги приводит к изменению характера распределения характеристик электрического поля растекания тока в ванне жидкого металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колистратов М.В.* Особенности переплава лома и слитков алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока и печах сопротивления / М.В. Колистратов, Г.А. Фарнасов // *Электротехнологии*. – 2013. – №8. С. 38–41.

2. *Миронов Ю.М.* Влияние межэлектродного промежутка на отклонение столба дуги / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // *Вестник Чувашского университета*. – 2009 – № 2 – С. 139–142.

3. *Mironov J.M.* Influence of an electric arch on liquid metal in arc furnaces / J.M. Mironov, D.G. Mihadarov // XVII Congress UIE 2012 Energy efficient, economically, sound, ecologically respectful, educationally enforced electrotechnologies. – St. Petersburg, 21-25 May 2012 – 2 p.

4. *Миронов Ю.М.* Электродинамические взаимодействия в дуговых печах постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2010 – С. 31–34.

5. *Михадаров Д.Г.* Дуговая печь постоянного тока для переплава алюминия / И.Н. Васильев, Ю.М. Петросов Материалы VI Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности», г. Чебоксары, 2022 г. С. 328–332.

6. *Тарасов В.А.* Аналитический расчет растекания тока в ванне печи дугового режима / В.А. Тарасов, А.И. Козлов // Исследование специальных вопросов электротермии: межвузовский сборник. Чебоксары. – 1982.

Авторы:

Михадаров Денис Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2003 году. Степень кандидата технических наук получил в 2016 году, диссертация защищена по специальности 05.09.10 «Электротехнология». E-mail: denis_georg@mail.ru.

Ильгачёв Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 1971 году. Степень кандидата технических наук получил в 1984 году, диссертация защищена по специальности 05.09.10 «Электротехнология». E-mail: anikil47@mail.ru.

Васильев Иван Николаевич, инженер кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2022 году. E-mail: vanya2001.vasiljev@gmail.com

ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ И ОТХОДОВ

Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Афанасьев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Кузьмин М.Г., ООО «СКБ «Сибэлектротерм», г. Новосибирск, Россия

***Аннотация.** Исследованы возможности использования электро-термической газификации твердых топлив твердых углеродосодержащих топлив и отходов. Показаны энергетические и технологические преимущества комбинированной технологии электрошлаковой газификации. Опробована реализация технологии на электрошлаковой электродной установке, для выработки синтез-газа и получения углевосстановительными процессами ферросплавов из оксидов сырья и добавляемых рудных материалов, позволяющую использовать дешевую электрическую энергию ночных минимумов.*

***Ключевые слова:** электротермическая газификация, шлаковосстановительные процессы, высококачественный синтез-газ, комплексное использование сырья, потребитель-регулятор.*

Энергетика, металлургия и химическая промышленность это наиболее энергоемкие сектора экономики, зависимые от первичных невозобновляемых энергоносителей. В энергетике на современном уровне производства и потребления электрической энергии около 67 % электричества вырабатывается из органических видов топлив. И если природный газ является эффективным видом топлива, как с точки зрения экологии, транспортировки и возможности его использования в современных видах тепло и электрогенерирующего оборудования, то твердые виды топлив (ТВТ) – уголь, торф, а также твердые углеродосодержащие отходы производства и потребления, являются крупнейшими загрязнителями окружающей среды [1]. Однако именно ТВТ распространены и имеют разведанные запасы, значительно превышающие запасы природного газа и нефти. Современное развитие топливно-энергетического комплекса требует повышения эффективности использования первичных энергоносителей с учетом затрат на добычу, транспортировку и переработку. Во-

влечение в энергетические балансы местных видов топлив позволяет снизить издержки на энергообеспечение потребителей за счет сравнительно низкой их стоимости, уменьшения транспортных расходов, но сложность их использовать в малой расщелоточенной электроэнергетики остается существенным препятствием. Наряду с этим актуальной задачей является рациональное использование вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в виде отходов, побочных и промежуточных продуктов производств и энергии.

С другой стороны применение низкосортных ТВТ в энергетике ограничивается значительными транспортными расходами, а также невозможностью их использовать в современных автоматизированных газотурбинных и газопоршневых технологиях когенерации в децентрализованной электроэнергетике.

Дополнительно следует отметить, что сжигание ТВТ имеет три ключевых недостатка:

а) каждый энергетический котел спроектирован под определенный вид топлива, например, наличие серы в топливе повышает точку росы дымовых газов, что сопровождается необходимостью увеличения допустимой температуры дымовых газов и уменьшением КПД котельной установки;

б) невозможно в широком диапазоне обеспечить устойчивость работы пылеугольных горелок без подсветки, при снижении тепловой нагрузки котла;

в) в золах уноса и шлаках содержатся вредные и ценные минералы, загрязняющие окружающую среду, являющиеся канцерогенными для человека.

Особые трудности возникают при использовании низкосортных топлив (бурый уголь, отходы, сланцы, биомасса), которые содержат большое количество влаги и минеральных примесей, имеют низкую теплоту сгорания [2, 3, 4], а энергетическое оборудование для их использования имеет низкую степень механизации и автоматизации. Все это привело к снижению в энергетических балансах регионов вторичных энергетических ресурсов, практически полностью исчезли некондиционная древесина (переспелая, пораженная вредителями и пожарами) и вторичные древесные ресурсы (отходы лесозаготовки и переработки древесины, включая ветки, кору, хвою, опилки, стружки и

прочие). Необходимость повышения энергетической безопасности делает весьма актуальным разработку технологий переработки местных видов низкосортных твердых в газообразное топливо с высокой энергетической и экологической эффективностью. Это требует совершенствования технологий использования этих энергоносителей не только для генерации тепловой и электрической энергии, но и для производства синтетических углеводородных жидких и газообразных продуктов.

Преодолеть эти недостатки может газификация ТВТ в местах его добычи или удобной транспортной доставки с отделением лишь горючей газовой части, ее менее затратной передачей по газопроводу к потребителям. Энергообеспечение не газифицированных населенных пунктов путем газификации ТВТ в энерготехнологических комплексах с глубокой переработкой шлаков, улавливанием зол уноса и очисткой дымовых газов, последующей транспортировки синтез-газа к установкам децентрализованной выработки тепловой и электрической энергии в центрах нагрузок является одним из возможных путей повышения эффективности промышленной и коммунальной энергетики.

Для топлив с высоким содержанием летучих веществ целесообразна такая термическая переработка как пиролиз (нагрев без доступа воздуха), при котором получают жидкие и газообразные горючие продукты и полукокс (углистый остаток). Полученные при пиролизе жидкие и газообразные продукты могут быть использованы в качестве горючего в котельных, когенерационных и парогазовых установках, а также в химических технологиях. Полукокс может быть использован в качестве восстановителя в металлургических технологиях и для получения активированного угля. Из угля и полукокса путем высокотемпературной газификации можно получить горючий синтез-газ.

В энергетике целевым продуктом газификации является газообразная часть комплексной переработки ТВТ и требования к технологии и оборудованию предварительно можно сформулировать как:

Высокая теплота сгорания получаемого синтез-газа и минимальный объем вредных и балластных компонентов в синтез-газе;

Широкий диапазон производительности по синтез-газу;

Надежная работа агрегата газификации без остановки свыше нескольких тысяч часов сезонной компании, и более 200 тыс. часов планового ресурса.

Технологии газификации могут быть автотермическими, аллотермическими или комбинированными, каждая технология обладает определенными преимуществами и недостатками [2, 3, 7]:

1. Автотермический процесс предъявляет высокие требования к химическому и гранулометрическому составу первичного сырья, возможен только в узком диапазоне режимов, имеет ограниченные возможности изменения производительности и смещения равновесия химических реакций за счет изменения температуры. До 30% топлива расходуется на поддержание температуры процесса. Снижение температуры процесса не только приводит к снижению производительности, но и риску образования чрезвычайно токсичных соединений при наличии хлорсодержащих материалов в отходах [1]. В Московском институте стали и сплавов разработан способ получения газов из углей в печи барботажного типа РОМЕЛТ [2], где ТВТ подается в шлаковую ванну, барботируемую кислородсодержащим дутьем. Частицы ТВТ замешиваются в шлаке, в котором протекают процессы испарения и конверсии паров воды, выделения летучих, газификации коксового остатка. Отходящие из печи генераторные газы содержат менее 10% CO_2 и H_2O . В газогенераторе РОМЕЛТ возможна комплексная переработка твердого топлива с частичным извлечением ряда черных и цветных металлов в металлическую фазу, образованную на базе углеродистого расплава железа.

2. Аллотермический процесс осуществляется с подводом, как правило, более дорогостоящего энергоносителя обеспечивающего:

- интенсификацию процесса,
- снятие ограничений по химическому составу сырья,
- получение синтез газа без балластного азота с минимальным содержанием углекислого газа и водяного пара;
- широкий диапазон производительности технологического комплекса.

Аллотермический процесс позволяет вести переработку любых твердых топлив, некоторых отходов производств при температурном режиме, обеспечивающим разложение всех органических компонентов (смола, диоксинов, фуранов) до оксидов углерода и водяных паров [3].

Температура в рабочем пространстве должна быть достаточной для разрушения любых супертоксиантов и смолистых веществ (более 2000 К). При переработке отходов быстрое и глубокое охлаждение, а также многократная очистка отходящих газов, позволяют избежать образование диоксинов и других супертоксиантов. Аллотермические установки позволяют вести процессы в средах разного состава при различных давлениях.

3. Комбинированная электрошлаковая технология – это совмещенные аллотермическая и автотермическая технологии, которая позволяет гибко управлять процессом газификации и проводить восстановительные процессы при меньшем потреблении электрической энергии. В этом случае появляется возможность использования газификатора как регулятора мощности в энергосистеме, снижая потребление электроэнергии (в часы пик), и восстановления части оксидов в шлаковом расплаве с получением ферросплавов введением дополнительной электрической энергии в часы ночного минимума электропотребления. При резистивном нагреве в электродных печах вследствие большой тепловой инерции, возможно существенное снижение мощности в часы пик, перебои в электроснабжении не приводят к нарушению процесса [7].

В настоящее время известны два направления аллотермической газификации твердых видов топлив: плазменная и электрошлаковая [3].

Плазменная и электрошлаковая технологии позволяют совместить в технологическом процессе газификацию с восстановлением оксидов минеральной части ТВТ, следовательно не нужно подводить воздух в реакционную зону и не загружать синтезгаз балластным N_2 и получать наряду с газом с высокой теплотворной способностью дополнительный полупродукт для металлургии – ферросплав.

Плазменная технология [5] заключается в нагревании угольной пыли электродуговой плазмой до температуры газифи-

фикации, при которой органическая масса угля преобразуется в экологически чистое горючее – синтез-газ, свободный от частиц золы и оксидов серы. Происходит восстановление оксидов минеральной массы угля углеродом и образование ценных компонент, таких как кремний, ферросилиций, алюминий и силумин.

С точки зрения экологии температура в рабочем пространстве плазменных установок достаточна для разрушения любых супертоксикантов и смолистых веществ, однако такая температура может быть достигнута и в электродных установках дугового и резистивного нагрева при значительно меньшем расходе электроэнергии. Слишком высокая температура отходящих из рабочей зоны газов затрудняет быстрое и глубокое охлаждение, что может привести к проблемам образования токсичных соединений при наличии в ТВТ и отходах углерода и хлора. К технологическим ограничениям использования плазменных технологий можно отнести сравнительно низкую стойкость электродов плазмотронов и определённые ограничения на электрические режимы, когда перерывы в электроснабжении вызывают нарушение процесса.

Технологии переработки углеродосодержащих отходов и газификации ТВТ, исследование которых ведётся в Чувашском государственном университете [6, 7], были опробованы на лабораторной и опытно-промышленной установке. На лабораторном стенде в Чувашском государственном университете и при опытной газификации угля на флюсоплавильной печи У-560 в цехе ЛЦ-3 АО «Промлит» в процессе экспериментов был опробован переход от резистивного нагрева на дуговой режим, это позволяет значительно повышать температуру в рабочей зоне, соответственно воздействовать на кинетику восстановительных процессов.

Прототипом промышленных установок газификации ТВТ и переработки отходов может стать конструкция герметичных рудовосстановительных печей (РВП), спроектированные в «СКБ Сибэлектротерм». Такие агрегаты допускают существенное снижение потребляемой из сети мощности и перерыв в электроснабжении на несколько часов, позволяют перерабатывать твердые топлива без размола, в том числе отходы, с возможностью глубокой переработки и восстановления оксидов с получением металлических сплавов, стройматериалов и удобре-

ний из шлаков [8, 9]. Подобные установки могут быть выполнены на различные производительности по получаемым продуктам, адаптированы к различным видам ТВТ и отходов, а опыт эксплуатации РВП подтверждает возможность их непрерывной работы несколько сезонов.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили определить технологические характеристики электротермической газификации различных видов твердого топлива, а также рассчитать основные параметры электротермических газификаторов различной мощности при использовании водяного пара, газообразного кислорода и кислорода, содержащегося в рудах [9, 10, 11].

При электротермической шлаковой газификации паром синтез-газ может содержать до 56,2 % водорода и 43,5% оксида углерода, при газификации паром и кислородом – до 54 % водорода и 44,3% оксида углерода, при газификации кислородом-до 28 % водорода и 71% оксида углерода, состав синтез-газа плазменной газификации аналогичен составу газа электротермической шлаковой газификации паром, при автотермической газификации в шлаке в составе газа преобладает оксид углерода (табл. 1).

Таблица 1
Сравнение характеристик синтез-газа, полученного при различных технологиях, с природным газом

Вид процесса газификации	Характеристики процесса			
	Содержание в синтез-газе			Низшая теплота сгорания газа, МДж/м ³
	оксида углерода, %	водорода, %	метана, %	
Электротермическая паром	43,5	56,2	–	11,55
Электротермическая кислородом и паром	54	45,3	–	11,7
Плазменная	43	54,3	1,3	11,74
В шлаковом расплаве (Ромелт)	77	14	–	11,21
Паровоздушная бурого угля	30	13	2	5,900
Природный газ	–	–	84,5	35,48

Секция 5

Теплота сгорания синтез-газа в 3 раза меньше, чем у природного газа, однако и расход необходимого для горения воздуха и выход дымовых газов также в три раза меньше, поэтому при замене природного газа синтез-газом не потребуется менять тягодутьевые устройства.

В табл. 2 приведены показатели режимов комбинированного газификатора, при постоянстве энергии получаемого синтез-газа, и использования ночной энергии для восстановления минеральной части угля и рудных добавок [14].

Таблица 2

Показатели режимов электротермического газификатора

Электротехнологический режим	Дефицит электроэнергии в системе (день)	Избыток электроэнергии в системе (ночь)	
		Кислород и оксиды кремния	Кислород и оксиды железа
Газифицирующие агенты	Кислород	Кислород и оксиды кремния	Кислород и оксиды железа
Активная мощность газификатора, кВт	7,2	1000	1000
Расход			
Кислород, $\text{м}^3/\text{час}$	566	481	423
Уголь, кг/час	800	800	800
Оксиды восстанавливаемых элементов, кг/час	-	210	611
Шлакообразующие, кг/час			100
Железная стружка, кг/час	-	23	-
Выход			
Металлический сплав, кг/час	16	117	400
Продукт металлический	чугун	Ферросилиций ФС-75	чугун
Продукт газообразный, $\text{м}^3/\text{час}$	1200	1200	1200
Химический энергетический потенциал газов, ГДж	14,4	14,4	14,4

Продолжение табл. 2

Физическое тепло газа при 1000 С, ГДж	1,68	1,68	1,68
Общий энергетический потенциал газов, ГДж	16,08	16,08	16,08
Тепловая мощность при сжигании газа Гкал/час	3,838	3,838	3,838
Тепловая мощность при сжигании газа, кВт	4451	4451	4451

Электрошлаковые газификаторы могут работать в широком диапазоне потребляемой из сети мощности без снижения выхода синтез-газа, следовательно могут быть использованы как регуляторы мощности энергосистемы.

Выводы

Анализ технологий, результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает преимущество комбинированных технологий газификации ТВТ и термической переработки отходов. Технологически для энергетических, металлургических и химических производств предпочтительней является электрошлаковая газификация в герметичной электродной печи.

Аллотермическая плазменная технология имеет худшие энергетические показатели, требует дополнительное приготовление газифицируемого ТВТ, а плазмотроны имеют ограниченный ресурс работы. Такая технология целесообразна для утилизации высокотоксичных отходов (медицинских, промышленных) в небольших объемах.

Комбинированная технология газификации в шлаковом расплаве позволяет получить синтез-газ для использования в энергетических целях с меньшими затратами, гибко управлять процессом и использовать для энерготехнологических комплексов по переработки ТВТ и отходов в синтез-газ, построения локальных систем газоснабжения и децентрализованной электроэнергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Л.А. Обеспечение экологической безопасности. Термические технологии уничтожения [Электронный ресурс] / Л.А. Федо-

ров; отв. ред. В. В. Оноприенко. – М.: Наука, 1993. – Режим доступа: <http://www.seu.ru/csi/lib/books/dioksiny/8/02.htm>.

2. Газификация угля в шлаковом расплаве / А.В. Баласанов, В.Е. Лехерзак, В.А. Роменец, А.Б. Усачев; под ред. А.Б. Усачева. – М.: «Институт Стальпроект», 2008. – 288 с.

3. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Анализ технологий газификация твердого топлива // Вестник Чувашского университета. – 2010. № 3. – С. 194–205.

4. Соколов Б.А. Котельные установки, работающие на твердом топливе: учеб. пособие / Б.А.Соколов. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 64 с.

5. В.Е. Мессерле, А.Л. Моссэ, А.Б. Устименко // Плазменная газификация углеродсодержащих отходов: термодинамический анализ и эксперимент Теплофизика и аэромеханика, 2016, том 23, № 4.

6. Патент РФ RU № 2117217 С1 «Способ переработки твердых бытовых и промышленных отходов». Ковалев В.Г., Лоскутов В.И., Никонов Н.А., Петелин Ю.Ю., Сидоров В.С., Тарасов В.А., Илларионов И.Е., Сахалкин А.Г. Опубликовано 08.10.1998.

7. Патент РФ RU 2521638 С2. Способ газификации углеродсодержащих твердых видов топлива / В.Г. Ковалев, В.В. Афанасьев, В.А. Тарасов. Опубликовано 10.07.2014 Бюл. № 19.

8. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Технологические характеристики электротермической газификации различных видов твердого топлива // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 33– 39.

9. Афанасьев В.В. В.Г. Ковалев. В.А. Тарасов Исследование процессов энерготехнологической переработки низкосортных твердых топлив путем газификации. // Образование и наука в России и за рубежом, 2020, No3 (Vol.6 224-234).

10. Афанасьев В.В. В.Г. Ковалев. В.А.Тарасов, В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасова В.В. Исследование электрических режимов электротехнологического газификатора. Вестник Чуваш.ун-та. – 2013. – Том 3. – С. 169–176.

11. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Энерготехнологические комплексы как регуляторы работы электроэнергетических систем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 5. С. 50–58.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, см. стр. 213.

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского

государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: volodtar@yandex.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, см. стр. 214.

Кузьмин Михаил Георгиевич, кандидат технических наук, Председатель Совета директоров ООО «СКБ Сибэлектротерм». E-mail: skb@skbterm.ru.

РАСЧЕТ СРОКОВ СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цицонь И.И., Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

***Аннотация.** В данном исследовании были проведены расчеты и проанализированы полученные результаты сроков службы изоляции кабельных линий напряжением 10 кВ при различных способах прокладки, с различными температурами окружающей среды и с различными типами изоляции. В рамках данной работы представлена методика расчета и сводные данные получившихся результатов по срокам службы изоляции кабелей, также проведен анализ полученных функций, приведены результаты по аппроксимации и выбрана наиболее точная зависимость, которая описывает графическим выражением изменением срока службы. Параметры кабелей и температурные показатели были взяты из магистерской диссертации и в рамках данного исследования осуществляется углубленное изучение кабельных линий.*

***Ключевые слова:** кабельные линии, старение изоляции, срок службы кабельных линий, коэффициент загрузки.*

Для осуществления расчетов сроков службы кабельных линий воспользуемся результатами, полученными при анализе и расчете температурных параметров, сделанных в другой работе. В табл. 1 представлена сводная таблица с результатами. Расчеты будут проводиться на основании среднемесячной летней температуры по республике Татарстан. В качестве анализа существующих способов прокладки выбраны прокладка на воздухе, прокладка в траншее и прокладка в земле в трубе.

Таблица 1

Результаты расчетов температурных параметров кабелей напряжением 10 кВ при различных способах прокладки и с $k_3 = 0,88$ для алюминиевых жил, $k_3 = 0,7$ для медных жил

Марка кабеля	Способ прокладки	T_1 , К·м/Вт	$T_{\text{каб}}$ при $t_{\text{окр}}=20^\circ\text{C}$
ВБбШв	Земля	0,05	49,7 °С
	Земля+труба	0,05	55,7 °С
АВБбШв	Земля	0,05	68,9 °С
	Земля+труба	0,05	78,9 °С
ААШв	Земля	0,064	65,7 °С
	Земля+труба	0,064	77,6 °С
	Воздух	0,064	69,8 °С
ВВГ	Воздух	0,054	47,4 °С
	Земля+труба	0,054	54,6 °С
АВВГ	Воздух	0,054	65,1 °С
	Земля+труба	0,054	77,0 °С
ППГ	Воздух	0,036	46,3 °С
	Земля+труба	0,036	55,4 °С
АППГ	Воздух	0,036	63,3 °С
	Земля+труба	0,036	78,4 °С

Для наиболее детального представления результатов выбранные кабели имеют различную изоляцию, а именно поливинилхлорид-далее ПВХ, бумажно-пропитанная изоляция-далее БПИ.

При проведении исследования установлено, что распределение тепла от токопроводящей жилы к оболочке происходит быстрее при прокладке кабеля на воздухе, так как в данном случае не нарушен теплообмен с окружающей средой. Исходя из этого расчет скорости старения и срока службы изоляции будем проводить для кабелей АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{31} = 0,82$ и $k_{32} = 0,88$ при прокладке в земле в трубе, так как при таком режиме эксплуатации кабель испытывает наибольший нагрев. При $k_{31} = 0,82$ температура жил исследуемого кабеля составляет 70°C , что является длительно допустимой температурой жил кабеля в нормальном режиме для ПВХ-изоляции по справочным данным.

Для расчета скорости старения изоляции воспользуемся законом Аррениуса. Уравнение зависимости скорости термической реакции от температуры кабеля по закону Аррениуса определяется соотношением:

$$t_{p1} e^{\frac{-W_a}{kT_1}} = t_{p2} e^{\frac{-W_a}{kT_2}},$$

где t_{p1} и t_{p2} – срок службы кабелей при значениях температур T_1 и T_2 соответственно;

W_a – энергия активации в расчете на одну молекулу;

k – постоянная Больцмана ($1,381649 \times 10^{-23}$ Дж/К);

T_1 и T_2 – значения абсолютных температур исследуемых кабелей соответственно.

Исследуем динамику старения для кабелей АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{31} = 0,82$ (что соответствует нормальной температуре эксплуатации 70°C для данного типа изоляции) и $k_{32} = 0,88$ (что соответствует расчетному значению температуры 77°C при эксплуатации кабеля в земле в трубе).

$$\frac{t_{p(70)}}{t_{p(77)}} = e^{\frac{62450}{8,31} \left(\frac{1}{273+70} - \frac{1}{273+77} \right)} = 1,55.$$

Таким образом, в течение длительной работы кабеля (более 3 часов непрерывной работы в сутки) при $k_{32} = 0,88$ и соответствующему данному режиму работы температуре 77°C – реакция термической деструкции в ПВХ-изоляции протекает в 1,55 раз быстрее, чем при аналогичных условиях и температуре жил кабеля 70°C с загруженностью равной $k_{31} = 0,82$.

Нормативный срок службы кабеля составляет 30 лет или 262800 часов. Учитывая, что при перегрузке на 9 % относительно допустимого $k_{31} = 0,82$, изоляция из поливинилхлоридного пластика подвергается воздействию повышенной температуры 77°C , при этом срок службы кабеля снижается на 27–30 % и составляет порядка 19–20 лет с учетом погрешности 5 %.

Построим график функции по результатам расчетов срока службы кабеля АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе исходя из полученных данных по скорости старения изоляции, а также определим зависимость путем применения метода ап-

Секция 5

проксимации функции и расчета величины достоверности аппроксимации R^2 .

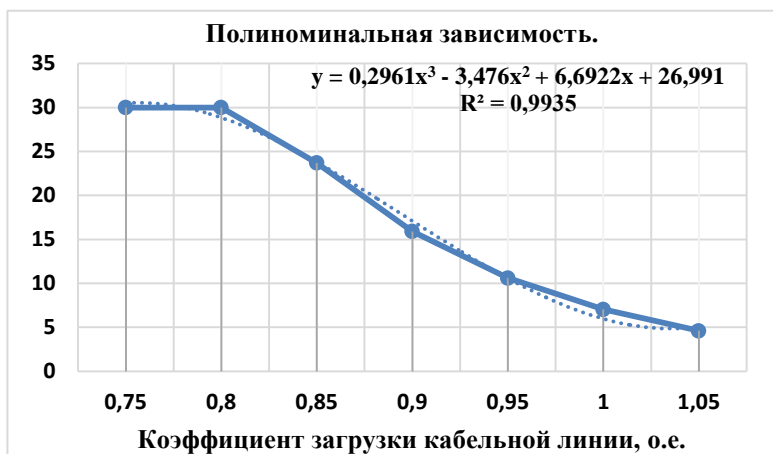


Рис. 1. График зависимости срока службы кабеля АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от коэффициента загрузки кабельной линии, выраженной полиномиальной зависимостью

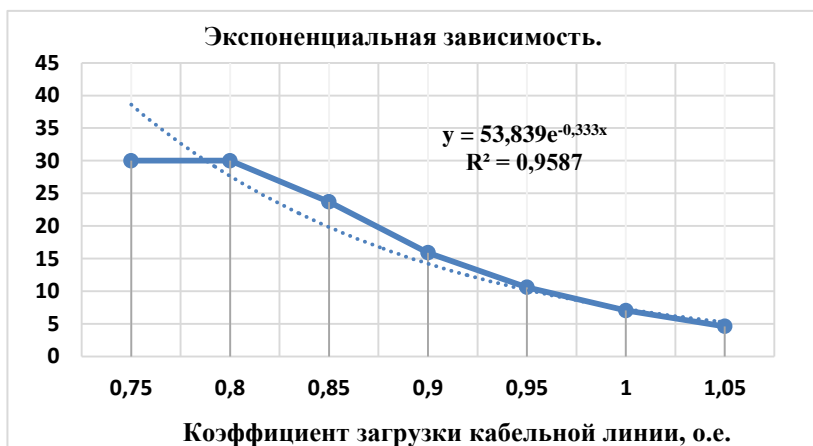


Рис. 2. График зависимости срока службы кабеля АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от коэффициента загрузки кабельной линии, выраженной экспоненциальной зависимостью

Составим сводную таблицу (табл. 2) по данным аппроксимирующим функциям, полученным в следствие проведенных расчетов, и сделаем вывод по наиболее точной из них, значение достоверности аппроксимации которой стремится к единице.

Таблица 2
Сводная таблица полученных аппроксимирующих функций

Уравнение аппроксимации	Вид аппроксимирующей функции	Величина достоверности аппроксимации
$y = 0,2961x^3 - 3,476x^2 + 6,6922x + 26,991$	Полином 3-ей степени	0,9935
$y = -4,8293x + 36,723$	Прямая линия	0,9648
$y = 53,839e^{-0,333x}$	Экспонента	0,8921

По полученным зависимостям можно сделать вывод, что наиболее близкая величина достоверности аппроксимации R^2 к единице выражается у полиномиальной зависимости, таким образом зависимость срока службы изоляции кабеля от коэффициента загрузки можно описать уравнением:

$$t = 0,2961k^3 - 3,476k^2 + 6,6922k + 26,991,$$

где t – срок службы изоляции кабеля; k – коэффициент загрузки кабельной линии.

Данное уравнение позволяет наиболее точно определить срок службы кабельной линии, зная информацию по коэффициенту загрузки рассматриваемой линии.

В табл. 3 представлены результаты расчетов сроков службы изоляции кабелей по полученному уравнению.

Таблица 3
Результаты расчета срока службы изоляции кабелей напряжением 10кВ с $k_3=0,88$ в зависимости от типа изоляции

Марка кабеля	Тип изоляции	Допустимая температура изоляции кабеля по ГОСТ	Расчетная температура кабеля, °С	Срок службы изоляции кабеля, лет	Срок службы кабеля, работающего с $k_3 = 0,88$
АППг	ПЭ	70	78,4	30	17,8
ААШв	БПИ	60	77,6	30	9,7
АВВГ	ПВХ	70	77,0	30	19,4

При $k_3 = 0,88$ кабели на напряжение 10кВ со всеми рассматриваемыми типами изоляции испытывают преждевременное тепловое старение в следствие перегрева жил более чем на 5°C.

Таким образом, по данным расчетам и полученным результатам можно сделать вывод, что для кабелей на напряжение 10 кВ при прокладке в земле в трубе оптимальными режимами загрузки в зависимости от типа изоляции являются:

- 0,82 для кабелей с ПВХ-изоляцией;
- 0,81 для кабелей с изоляцией из полиэтилена;
- 0,73 для кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

При данных значениях загруженности кабельные линии на напряжение 10 кВ при прокладке в земле в трубе не будут испытывать чрезмерного перегрева в процессе эксплуатации, что позволит предотвратить тепловое старение изоляции.

Вывод

В работе проведенное исследование и анализ полученных после расчетов результатов, которые позволили сделать вывод, что основным параметром, который влияет на нагрев кабеля в большей мере является коэффициент загрузки. Также установлены оптимальные значения коэффициентов загрузки для кабелей напряжением 10 кВ при прокладке в земле в трубе для различных типов изоляции. Данные значения дают нам процентное представление о том, на сколько может быть нагружена линия без риска перегрева и дальнейшего ускорения теплового старения кабельной линии. Это позволит наиболее точно выполнить расчеты и выбрать режимы работы для кабелей на этапе проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019.Т. 11. № 4(44). С. 22–29.

2. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 81–92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92.

3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследование методов расчета электрических нагрузок цеховых систем промышленного электроснабжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 1 (52). С. 54–59.

4. Грачева Е.И., Гиззатуллина Е.Е. Анализ надежности цеховых сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 5–6.

5. Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследования показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №9–10.

6. Титков В. В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // КАБЕЛЬ-News. № 10.

7. Ковригин Л. А. и др. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS // КАБЕЛЬ-News. № 4.

Автор

Цицонь Иван Иванович, аспирант Казанского государственного энергетического университета.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАНА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 10(6)–35 кВ

**Максютов Б.А., Валеев И.М., ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
г. Казань, Россия**

***Аннотация.** В работе рассмотрен подход для повышения эффективности реализации плана организационно-технических мероприятий, направленных на снижение потерь электрической энергии на предприятиях электрических сетей напряжением 10(6)–35 кВ. Существует ряд мероприятий [1-3], позволяющих получить значительное снижение величины потерь электроэнергии (в некоторых случаях до 50 % от общей величины плана).*

Проведенные исследования показывают, что задача оптимизации загрузки силовых трансформаторов является актуальной как для теоретических, так и для практических исследований. Особенно важно отметить конкретную методику для определения силовых трансформаторов с оптимальной загрузкой.

В работе также отмечено, что получение наибольшего энергетического эффекта по снижению величины потерь достигается выбором интеллектуальных трансформаторов при обязательном сохранении необходимого уровня качества и надежности электроснабжения потребителей.

В рамках реализации методики в работе приведены примеры расчета коэффициента эффективности применяемых трансформаторов, которые в свою очередь определяются как произведение величин коэффициентов соотношений нагрузочных потерь и потерь холостого хода, надежности, оперативной гибкости и типа подстанции.

На основании данного подхода осуществлено практическое использование разработанной методики, дающей наибольший энергетический эффект.

Ключевые слова: *потери электрической энергии, компенсация реактивной мощности, план организационно-технических мероприятий.*

Актуальность

Главная задача регулирования экономикой предприятий - гарантия экономической устойчивости работы в условиях постоянно растущей стоимости топливно-энергетических ресурсов и нестабильности рынка [1-3]. Разветвленные электрические сети и высокие эксплуатационные нагрузки способствуют огромным потерям электрической энергии при транспортировке. Потери можно снизить за счет уменьшения реактивной составляющей в линиях и балансировки ее в точке потребления. Таким образом качественное, надежное и бесперебойное электроснабжение потребителей электрической энергии является приоритетным направлением деятельности для предприятий электрических сетей (ПЭС) [4].

В свою очередь для снижения технологического расхода электрической энергии осуществляется ряд мероприятий, таких как:

1. Улучшение методов регулирования режимами сетей;
2. Технизация СУ режимами работы сетей на базе цифровых подстанций;
3. Развитие методов и целей по реконструкции сетей, системы подстанций (как распределительной, трансформаторной, узловой, проходной и прочих);
4. Интеграция с системами технического и коммерческого учета электроэнергии с потребителями.

Часть потерь от холостого хода трансформаторов составляет до 65 % от общей части потерь в устройстве. Это подтверждается за счет плана организационно-технических мероприятий (ОТМ) – более 45 % от общего полученного эффекта понижения потерь составляет проведение мероприятий по отключению малозагруженных трансформаторов, при этом указанное значение может быть увеличено.

В данной работе показана эффективность новых методов определения режимов и выбора типа трансформатора в зависимости от его загруженности, а именно:

- решение задачи оптимизации загрузки силовых трансформаторов с новыми режимными ограничениями;
- способ выбора трансформаторов для подключения в план ОТМ;
- методики по нахождению загруженности трансформатора;
- установлены критерии оценки, которые позволяют оценить экономическую эффективность отключения трансформатора.

Постановка задачи. Цель исследования - создание методики для выбора трансформаторов. Активировав ОТМ, получить хорошее энергетическое эффекта, обеспечив при этом необходимый уровень качества и надежности электропитания.

Теоретическая часть

Основная задача энергосистемы - выпуск хорошей электрической энергии потребителям с большей эффективностью – мгновенным КПД, максимум которого достигается при коэффициенте загрузки трансформатора:

$$k_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\Delta P_{СТ}}{\Delta P_{МН}}} \quad (1)$$

где $\Delta P_{СТ}$ – потери активной мощности в стали, кВт;

$\Delta P_{МН}$ – потери активной мощности в магнитопроводе, кВт.

В зависимости от вида характеристик трансформатора значение оптимального коэффициента загрузки находится в пределах 0,42–0,6 [5].

Коэффициент нагрузки трансформатора – это показатель, определяющий способность объекта эффективно транспортиро-

вать электроэнергию. Приближение коэффициента нагрузки к подходящему значению приводит к приросту эффективности бизнеса. Отключение одного из двух работающих трансформаторов при понижении нагрузки не всегда эффективно [6].

Нужно выполнять мероприятия по замене измерительных трансформаторов на трансформаторы высокого класса точности, по проведению сертификации качества электроэнергии. Необходимо оптимально загружать трансформаторы и внедрить АСУ ТП, ввести учет потерь электричества от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ [7].

Вывод

1. Улучшение загрузки трансформаторов – целевая задача.
2. При учете оптимальности загрузки трансформаторов необходимо учитывать условия разнообразия установленного оборудования.
3. Представлены результаты практической реализации метода оптимизации нагрузки на силовой трансформатор и достигнут экономический эффект.
4. Работа по оптимизации загрузки силовых трансформаторов – актуальная как для теоретических, так и для практических исследований.
5. Введены методики для выявления трансформаторов с оптимальной нагрузкой.

После ряда исследований, авторы статьи сделали вывод, что при выборе трансформатора отключения целесообразно рассчитывать коэффициент.

P – коэффициент эффективности отключения трансформатора:

$$P = k^I \cdot k^{UO} \cdot k^{CON} \cdot k^{SAIFI} \cdot k^{SAIDI} \cdot k^{FLEX} \cdot k^{MODE} \cdot k^{SB}; \quad (2)$$

где k^I – коэффициент отношения между величиной потерь холостого хода и потерь под нагрузкой:

$$k^I = \frac{\Delta P_I}{\Delta P_L}; \quad (3)$$

k^{UO} – коэффициент отношения эффективного отпуска и значения потерь на холостом ходу:

$$k^{UO} = \frac{UO}{\Delta P_I}; \quad (4)$$

k^{CON} – коэффициент состава, структуры потребителей (выбирается на основе анализа структуры потребителей).

k^{SAIFI} – коэффициент качества электроснабжения (определяется из значения частоты отключения трансформатора).

k^{SAIDI} – коэффициент качества электроснабжения (определяется из значения продолжительности отключения трансформатора).

k^{FLEX} – коэффициент гибкости (определяется исходя из удаленности подстанции, времени оперативных переключений, индекса технического состояния):

$$k^{FLEX} = \frac{ITL}{t_W + t_O}; \quad (5)$$

k^{SB} – коэффициент вида станции, принимает одно из трех значений: 1 – тупиковая ПС, 0,5 – отпаечная ПС; 0 – транзитная или проходная ПС.

Упрощенная формула имеет вид:

$$P = k^I \cdot k^{UO} \cdot k^{FLEX} \cdot k^{SB}. \quad (6)$$

Этот коэффициент необходимо рассчитать для всех силовых трансформаторов, включаемых в план ОТМ.

Чем выше P , тем эффективнее отключение трансформатора.

Поэтому методика выбора трансформаторов для включения в план ОТМ по каждому силовому трансформатору следующий:

1. Расчёт коэффициента соотношения величины потерь по формуле (3);

2. Расчёт коэффициента полезного отпуска по ф. (4);

3. Расчёт коэффициента оперативной гибкости по ф. (5);

4. Определение коэффициента вида подстанции;

5. Расчёт эффективности отключения трансформатора по формуле (6);

6. Сравнение значения коэффициента эффективности отключения;

7. Расчёт эффективности мероприятий по отключению трансформаторов:

$$EE = \Delta W_E \cdot C; \quad (7)$$

$$\Delta W_E = T \cdot \Delta P_T; \quad (8)$$

T – время работы трансформатора, количество работы в часах (как правило 8760 часов в год).

Практическая часть

Опираясь на методику, которая представлена выше, были проведены расчеты для нескольких подстанций предприятия электрических сетей (в выборку вошли 7 двухтрансформаторных подстанции). Результаты представлены в таблице.

Таблица

Расчет коэффициента эффективности

Коэффициент	Наименование ПС и Т			
	ПС-1, Т-1	ПС-2, Т-1	ПС-3, Т-2	ПС-4, Т-2
Холостой ход	133	34	233	21
Полезный отпуск	0,061	2,44	8,33	4,94
Оперативная гибкость	0,72	0,51	0,69	0,94
Тип подстанции	1	1	0	0

В результате отключения трансформатора может быть получен следующий экономический эффект:

$$\Delta W_E = 8760 \cdot 0,013 = 76 \text{ тыс. кВт/ч,}$$

$$EE = 76 \cdot 2,7 = 205,2 \text{ тыс. руб. / год.}$$

Можно сделать вывод, что исследование заключается в том, что была разработана методика выбора мало загруженных трансформаторов с целью их отключения. В свою очередь это приведет к понижению потерь энергии, а следовательно, к повышению эффективности работы системы снабжения электричества.

Заключение

1. Оптимизация нагрузки трансформаторов – актуальная задача;
2. Предложен алгоритм выбора трансформаторов в плане ОТМ;
3. Увеличение КПД нагрузки трансформаторов приведет к уменьшению общего количества потерь электрической энергии, что в свою очередь повысит эффективность работы ПЭС;

4. Предложенная методика нашла практическое применение. В результате выбран один трансформатор для включения в план ОТМ;
5. Предложен коэффициент эффективности отключения трансформатора;
6. Рассчитаны ожидаемые экономические и энергетические последствия отключения выбранного трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтович, Н.В., Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н.В. Грунтович, Н.В. Грунтович, Л.Г. Ефремов и др. // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №3. – С. 40-48.
2. Федоров, О.В., Энергосберегающая политика. Учебное пособие / О.В. Федеоров, А.Б. Дарьенков – М.: КноРус. – 2015 – 294 с.
3. Голубцов, Н.В., Проблема эффективности использования энергоресурсов / Н.В. Голубцов, Л.Г. Ефремов, О.В. Федоров // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 18-22.
4. Мусаев, Т.А., Повышение эффективности формирования целевых значений показателей надежности электроснабжения SAIFI, SAIDI для предприятия электрических сетей / Т.А. Мусаев, Р.Н. Камалиев, С.Р. Шагеев // Энергетик. – 2018. – №8. – С. 11–13.
5. Фурсанов, М.И., Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение». – 2005 – 207 с.
6. Мироненко, Ю.Е., Оптимизация режимов работы силовых и автотрансформаторов центрального энергорайона Амурской области / Ю.Е. Мироненко // Молодежь XXI века: шаг в будущее, материалы XVIII региональной научно-практической конференции. – Благовещенск: Благовещенский государственный педагогический университет, 2017. – С. 1255–1256.
7. Дубинин, В.Н., Системный анализ энергосбережения в промышленности / В.Н. Дубинин // Перспективы устойчивого развития нефтегазовой отрасли.

Авторы:

Максотов Булат Айдарович, магистр ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Валеев Ильгиз Миргалимович, научный руководитель, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «КНИТУ».

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТА Понижающей подстанции

Хисматуллин А.И., ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

***Аннотация.** В статье описан алгоритм автоматизированного расчёта параметров схемы замещения эквивалента понижающей подстанции, используемый в системе автоматизированного расчёта уставок РЗА (далее – система). Полученные значения параметров используются системой для расчёта токов короткого замыкания, уставок защит силового трансформатора, линий 6(10) кВ, а также проверки измерительных трансформаторов тока. Работа алгоритма реализована с помощью программного пакета Excel.*

***Ключевые слова:** автоматизация, расчет параметров схемы замещения, релейная защита и автоматика, программный комплекс.*

Для производства программным комплексом автоматизированного расчёта пользователю необходимо указать следующие исходные данные:

1. Выбрать из раскрывающегося списка в соответствующем окне номинальные напряжения высокой ($U_{\text{ном ВН}}$) и низкой сторон ($U_{\text{ном НН}}$) сети, кВ;
2. Значения результирующих в максимальном ($X_{\text{с.рез.макс}}$) и минимальном ($X_{\text{с.рез.мин}}$) режимах короткого замыкания (КЗ) сопротивлений системы, с указанием единиц измерения – в относительных базисных или именованных единицах;
3. Значение базисной мощности энергосистемы (S_0), ВА;
4. Значение номинальной мощности силового понижающего трансформатора подстанции ($S_{\text{ном}}$), МВА;
5. Выбрать тип понижающего трансформатора подстанции, ввести его значение напряжения КЗ (U_k), %. Если выбран трансформатор с расщеплённой обмоткой, вводятся три значения напряжений КЗ ($U_{k \text{ ВН-НН}}$, $U_{k \text{ ВН-НН1}}$, $U_{k \text{ НН-НН1}}$).
6. Ввести предельное значение регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформатора ($\Delta U_{\text{РПН}}$).

Описание работы алгоритма

В первую очередь, система на основе введённых пользователем значений результирующих сопротивлений системы, и в

Секция 5

случае указаниях оных в относительных базисных единицах, производит перерасчёт данных значений в именованные единицы (Ом).

Далее, система рассчитывает значение максимального возможного напряжения системы с учётом РПН силового понижающего трансформатора ($U_{\max \text{ РПН}}$), значение которого не должно превышать стандартного значения максимального рабочего напряжения (U_{\max}), после сравнения которых системой будет использовано в качестве определяющего то или иное значение максимального рабочего напряжения системы.

Алгоритм представлен на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчёта результирующих сопротивлений и максимального возможного напряжения

На основе указанного типа трансформатора, а также введённых паспортных значений напряжений КЗ U_k , системой про-

изводится определение метода расчёта сопротивлений (различных для двухобмоточного трансформатора и трансформатора с расщеплённой обмоткой), и, соответственно, расчёт данных сопротивлений.

Для определения сопротивления силового трансформатора с расщеплённой обмоткой, система производит расчёт: коэффициента расщепления (K_p) (1), сопротивления обмотки стороны ВН трансформатора (2), и, впоследствии, сопротивлений обмоток трансформатора с учётом K_p (3).

Алгоритм представлен на рис. 2, 3.

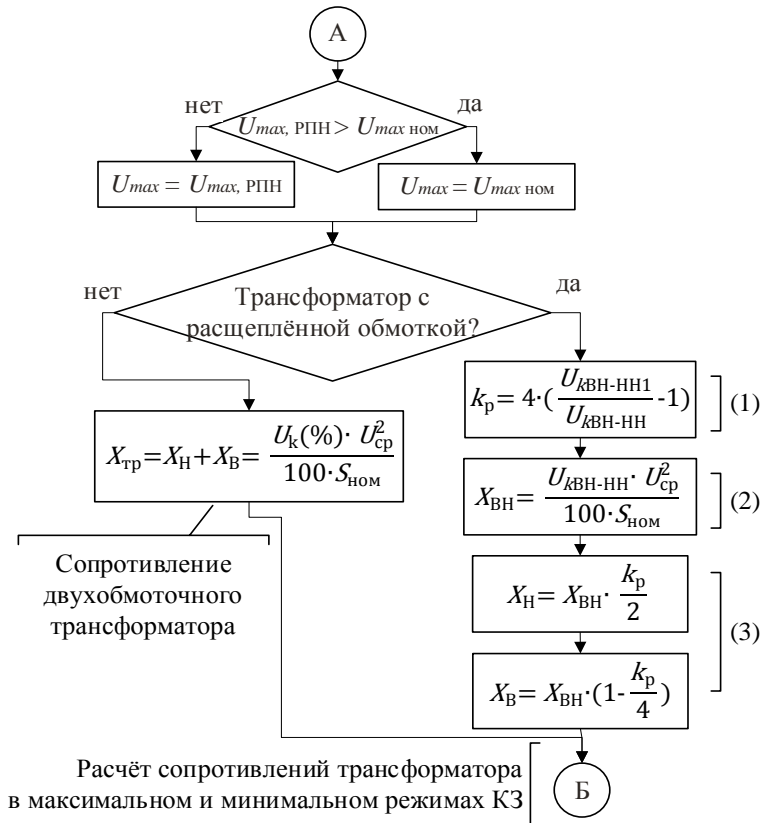


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчёта сопротивлений силового трансформатора

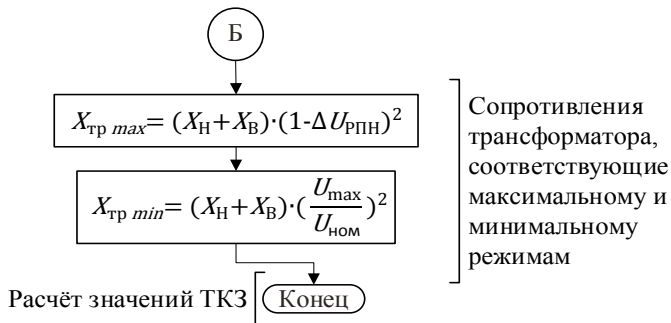


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта сопротивлений силового трансформатора, соответствующих максимальному и минимальному режимам КЗ энергосистемы

Впоследствии, исходя из полученных значений сопротивлений силового трансформатора, системой будет производиться расчёт значений токов КЗ в нескольких расчётных точках, на основе которых, в свою очередь, будет производиться расчёт уставок РЗА силового трансформатора напряжением 35-220 кВ, линий электропередач напряжением 6(10) кВ.

Выводы

Разработка данного алгоритма призвана упростить расчёт параметров схемы замещения понижающей подстанции при проектировании, в т.ч. для расчёта уставок РЗА.

ЛИТЕРАТУРА

Игуменцев В.А. Релейная защита и автоматика понизительных подстанций промышленного предприятия. Учебное пособие. / В.А. Игуменцев, В.К. Олейников, Н.Т. Патшин, Е.А. Панова. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – 108 с.

Автор

Хисматуллин Арслан Илхамович, магистр, студент, МГТУ им. Г.И. Носова. Кафедра электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова, 2023 г. Разработка системы автоматизированного расчёта уставок защит силового трансформатора и РУ 6(10) кВ понизительной подстанции промышленного предприятия. E-mail: khismatullin.ars@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ОКОЛОРЕЗОНАНСНОЙ РАБОТЕ

Матюнин А.Н., Васильев И.Н. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация:** Представлены результаты экспериментального исследования околорезонансной работы лабораторного трансформатора, показано влияние ёмкости на потребляемую активную мощность.*

***Ключевые слова:** компенсация мощности, конденсатор, резонанс токов, SimInTech.*

В работе [1] были представлены результаты исследования силового трансформатора при околорезонансной работе в режиме холостого хода; по показаниям цифрового измерительного прибора было обнаружено снижение энергопотребления, в том числе, потребляемой активной мощности при подключении компенсирующего (косинусного) конденсатора.

Целью данного исследования является повторение эксперимента при околорезонансной работе трансформатора, анализ потребляемой мощности. Объектом данного исследования является однофазный трансформатор ОСМ1-0,063.УЗ в составе учебного лабораторного стенда, оборудованного трёхфазным цифровым измерителем мощности DPM-3 (рис. 1).



Рис. 1. Измерение мощности конденсатора

Предварительное определение резонансной ёмкости

На рис. 2 показана схема SimInTech для определения значения ёмкости конденсатора, соответствующей околорезонансной работе. Данная схема позволяет определять методом компьютерного моделирования значение резонансной ёмкости при различном сопротивлении нагрузки R_n .

Модель однофазного 2-обмоточного трансформатора основана на T-образной схеме замещения [2]. Параметры схемы замещения трансформатора в свойствах блока SimInTech задаются

в относительных единицах, однако в блоке предусмотрена возможность расчёта параметров схемы замещения по каталожным данным трансформатора. Для этого требуются первичные результаты опытов х.х. и к.з. исследуемого трансформатора.

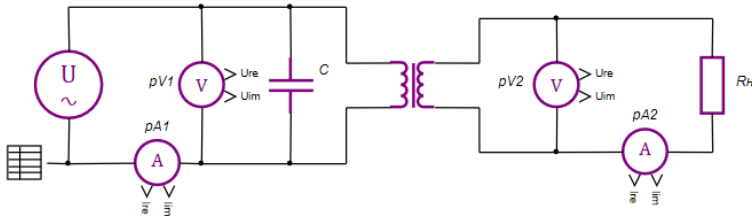


Рис. 2. Схема SimInTech для определения действующих и комплексных значений параметров исследуемого трансформатора

После проведения опытов х.х. и к.з. и расчёта параметров схемы замещения были определены приблизительные значения резонансной ёмкости по минимуму показаний виртуального амперметра pA_1 (rms/inst) для 3-х режимов работы в зависимости от сопротивления R_H . Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1
Значения резонансной ёмкости, определённые с помощью SimInTech

R_H , Ом	∞ (х.х.)	400	200
C , мкФ	0,8	0,7	0,6
I_{\min} , mA	31,0	44,9	60,4

Экспериментальное исследование

Подобраны конденсаторы с ёмкостью, близкой к резонансной: $C_1 = (0,87 \pm 0,03)$ мкФ, $C_2 = (0,47 \pm 0,01)$.

В табл. 2 представлены данные, полученные в режиме х.х. при подключении конденсаторов параллельно первичной обмотке трансформатора. Цифровой измеритель мощности DPM-3 подключался на входе схемы перед конденсаторами.

На рис. 3 представлены графики зависимости потребляемой активной мощности от значения ёмкости, подключаемой параллельно первичной обмотке трансформатора при значениях сопротивления нагрузки $R_{H1} = 400$ Ом, $R_{H2} = 200$ Ом (в соотв. со схемой рис. 2).

Результаты измерений при холостом ходе

C , мкФ	P , Вт	Q , вар	S , ВА	I_1 , мА
0	2,63	16,3	16,5	70
0,47	2,72	16,8	17	72,4
0,87	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
1,34	1,8	-10,8	11	47

Примечание: при ёмкости 0,87 мкФ значения измеряемых параметров были за нижней границей диапазона измерений прибора.

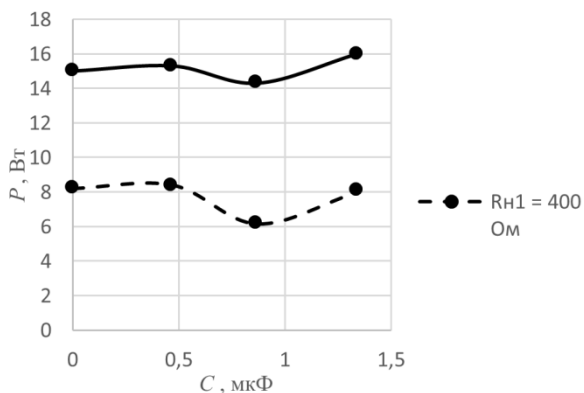


Рис. 3. Результаты измерений при нагрузке

Анализ результатов

Из табл. 2 и рис. 3 видно, что при увеличении значения параллельной ёмкости на входе трансформатора наблюдается изменение потребляемой активной мощности, а характер этого изменения можно разделить на три участка:

- 1) рост потребляемой активной мощности и реактивной индуктивной мощности;
- 2) снижение потребляемой активной мощности до минимума и реактивной индуктивной мощности до нуля;
- 3) рост потребляемой активной мощности и реактивной ёмкостной мощности.

Рост активной мощности на первом участке можно объяснить наличием двух составляющих: диэлектрических потерь в конденсаторе и ростом электрических потерь с ростом тока.

Рассмотрим математическое описание активной мощности при резонансе токов [3]. На основании закона сохранения энергии мощность, отдаваемая генератором (в нашем случае сетью), и мощность, расходуемая на тепло в активном сопротивлении контура, равны:

$$\frac{U^2}{Z_{\text{к рез}}} = \frac{U^2}{X_L^2} R,$$

где U – напряжение на зажимах генератора (в нашем случае напряжение однофазного питания), В; $Z_{\text{к рез}} = \frac{L}{CR}$ – сопротивление контура при резонансе; C – ёмкость контура, Ф; L – индуктивность контура, Гн; R – общее сопротивление потерь в контуре, Ом.

Резонансное сопротивление параллельного контура зависит от величины активного сопротивления потерь R и соотношения величин L и C , т. е. от волнового сопротивления контура. Чем больше R , тем больше энергии расходуется в нем на тепло и тем больше энергии (большая мощность) поступает от генератора в контур. Следовательно, чем больше сопротивление потерь R , тем больше ток в общей части цепи. Но по величине тока можно судить о величине сопротивления контура: чем больше ток, тем меньше сопротивление. Поэтому, чем больше сопротивление потерь, тем меньше сопротивление параллельного контура при резонансе. В отсутствие сопротивления $Z_{\text{рез}} = \infty$ [3].

Выводы

1. Экспериментальное исследование на лабораторном стенде подтвердило, что при околорезонансном режиме работы трансформатора наблюдается снижение потребляемой активной мощности.

2. Требуется дополнительное исследование с применением других средств измерения: осциллографа, стрелочных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюнин А.Н. Исследование компенсации реактивной мощности трансформатора в режиме холостого хода / А.Н. Матюнин, А.В. Медуницын // Проблемы и перспективы развития энергетики, элек-

тротехники и энергоэффективности: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, '22. – С. 333 –338.

2. Справочная система SimInTech (v13.04.2023) [Электронный ресурс]. URL: <https://help.simintech.ru/>.

3. Резонансные свойства RLC-цепей : [учеб.-метод. пособие] / [сост. В.Х. Осадченко, Я.Ю. Волкова, Ю.А. Кандрина]. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2013. – 64 с.

Авторы:

Матюнин Алексей Николаевич, кандидат технических наук, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2009 году. Защитил диссертацию на тему «Исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами» в 2019 году. E-mail: matyunin86@mail.ru.

Васильев Иван Николаевич, см. стр. 422.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУБИЛЬНИКОВ И ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Петров А.Р., Грачева Е.И., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

Аннотация. В статье разработаны алгоритм и модели оценки эффективности эксплуатации рубильников и предохранителей низковольтных сетей электроснабжения, которые позволяют уточнять величину потерь активной мощности и электроэнергии в электрооборудовании.

Ключевые слова: низковольтные коммутационные аппараты, потери мощности, контактные соединения, аппроксимирующие функции, сопротивление контактов.

Проведем анализ и исследование технических параметров рубильников и предохранителей, которые наиболее распространены на отечественных промышленных предприятиях [1]. Для исследования отобраны аппараты Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ), ИЕК и ряда зарубежных фирм производителей (ABB, Legrand). Практика показывает, что потери активной мощности на полюс ΔP в исследуемых аппаратах напрямую за-

висят от номинального тока аппарата I_n . По паспортным данным проведем анализ зависимостей потерь мощности от номинального тока для рубильников и предохранителей различных заводов-производителей [2].

Произведем аппроксимацию функций потерь активной мощности от номинального тока [3; 4]. Для исследуемых функций определим коэффициент детерминации R^2 и среднюю ошибку аппроксимации \bar{A} [5; 6].

Коэффициент детерминации R^2 вычисляется по выражению:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - y)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2},$$

где y_i – фактические значения переменных;

y – расчетные значения исследуемой величины;

$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ – среднее значение исследуемой величины;

$\sum_i (y_i - y)^2$ – сумма квадратов ошибок регрессии;

$\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - y}{y_i} \right| \cdot 100\% .$$

Ошибка аппроксимации должна составлять менее 15 %.

Данные показывают, что наибольшая точность аппроксимирующих выражений для параметров, исследуемых аппаратов, характерна для полиномиальных функций зависимости $\Delta P = F(I_n)$. Результаты аппроксимации исследуемых рубильников и предохранителей цеховых сетей представлены в таблице.

Из таблицы видно, что аппроксимация потерь мощности от номинального тока для низковольтных аппаратов является достоверной: коэффициент R^2 составил более 0,98, а ошибка \bar{A} не превышает значения 13,85 %. На рис. 1 и 2 показаны графические зависимости потерь мощности рубильников и предохранителей низковольтных сетей различных заводов-изготовителей.

Аппроксимирующие функции потерь мощности

Аппроксимирующая функция	R^2	\bar{A} , %
<i>Рубильники</i>		
РЕ19, Р (С, Б, Ц) «КЭАЗ»		
$\Delta P_1 = 6 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,053 \cdot I + 0,3651$	0,9998	2,23
РП «КЭАЗ»		
$\Delta P_2 = 11,2 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,07618 \cdot I_H + 3,554$	0,9999	0,03
ВР32 «КЭАЗ»		
$\Delta P_3 = 3 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,0895 \cdot I_H - 6,9903$	0,9955	11,28
ВНК «КЭАЗ»		
$\Delta P_4 = -1 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,06 \cdot I_H - 8,78$	0,999	2,0
РПС/РПБ (IEK)		
$\Delta P_5 = -7 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,1153 \cdot I_H - 1,4551$	0,999	2,07
SPX (Legrand)		
$\Delta P_6 = -4 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,104 \cdot I_H - 1,28$	0,992	7,35
XLP (ABB)		
$\Delta P_7 = 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,033 \cdot I_H - 1,975$	0,9991	3,16
Аппроксимирующая функция	R^2	\bar{A} , %
<i>Предохранители</i>		
ППН (КЭАЗ)		
$\Delta P_8 = -5 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,104 \cdot I_H - 0,015$	0,9966	13,85
ПН2 (КЭАЗ)		
$\Delta P_9 = -1 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,1303 \cdot I_H + 4,1768$	0,9868	10,8
ПНБ (КЭАЗ)		
$\Delta P_{10} = -2 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,1703 \cdot I_H + 2,2622$	0,9893	9,98
OFAA (ABB)		
$\Delta P_{11} = -8 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,1291 \cdot I_H + 0,9781$	0,9918	7,8
Тип gG (Legrand)		
$\Delta P_{12} = -4 \cdot 10^{(-5)} \cdot I_H^2 + 0,0936 \cdot I_H - 0,7518$	0,9935	6,96

Секция 5

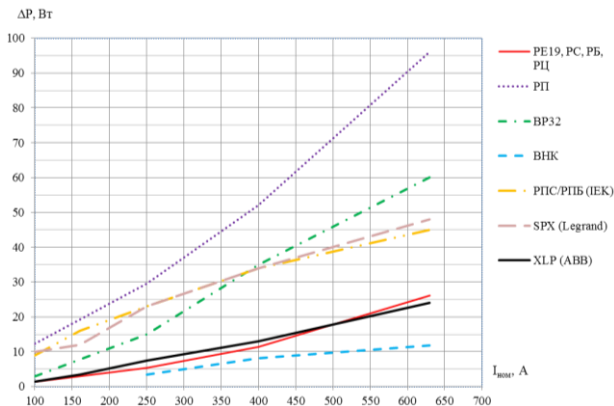


Рис. 1. Графические зависимости потерь мощности рубильников различных заводов-изготовителей

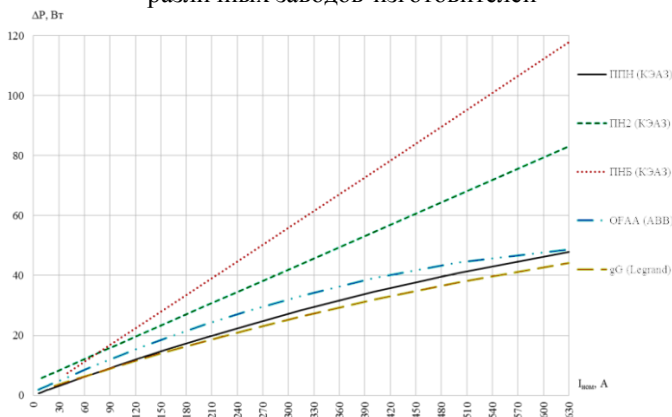


Рис. 2. Графические зависимости потерь мощности предохранителей различных заводов-изготовителей

Выводы

Анализ параметров рубильников и предохранителей низковольтных сетей и результаты проведенных экспериментов предлагают в качестве одного из критериев эффективности исследуемых аппаратов использовать значение потерь активной мощности ΔP и сопротивлений в контактных соединениях.

Большинство рубильников и предохранителей предназначены для работы при длительном замкнутом состоянии контактных соединений, поэтому необходимо, чтобы аппараты

функционировали со стабильным значением переходного сопротивления контактных групп.

Исследование показывает, что учет потерь мощности и сопротивления в контактных соединениях аппаратов внутривозовского электроснабжения позволяют в дальнейшем наиболее точно определять потери электроэнергии в этих сетях. Полученные зависимости позволяют выявить наиболее эффективные в эксплуатации типы аппаратов низковольтных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров А.Р. Исследование технических характеристик автоматических выключателей различных производителей / Научно-технический журнал «ВЕСТНИК ПИТТУ имени академика М.С. Осими». [Электронное издание]. – № 3 (24), 2022. – С. 44-51.

2. Грачева Е. И., Наумов О. В., Горлов А. Н. Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения // Вестник КГЭУ. 2019. №3 (43).

3. Петров, А.Р. Исследование функциональных характеристик автоматического выключателя / А.Р. Петров, Е.И. Грачева // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 201-205.

4. Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю., Афанасьев А. В. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15.

5. Ismoilov II, Gracheva EI. Increasing the control of power systems and improving the quality of electric power. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2022; 14; 1(53):3-12.

6. Hnatiuc B., Borta M. and Hnatiuc M., "Switching Transient Regime of Shunts Release from a Low Voltage Circuit Breaker Commanded by a PLC," 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania. 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905865.

Авторы:

Петров Алмаз Радикович, аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ». Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета (КГЭУ). E-mail: petrovall3@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна, см. стр. 303.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С РЕАКТИВНЫМ РОТОРОМ И С ПОВЫШЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Афанасьев А.Ю., Игнаев С.В., ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Россия

Макаров В.Г., ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Рассматривается математическое описание синхронных двигателей с количеством фаз обмотки статора от одного до шести, реактивным ротором и неподвижной обмоткой возбуждения переменного тока. Проведен анализ электромагнитных процессов в установившемся режиме работы. При этом особое внимание уделяется формированию электромагнитного момента, а также влиянию обмотки возбуждения на этот процесс.*

***Ключевые слова:** синхронный двигатель, реактивный ротор, повышенная скорость вращения, электромагнитный момент.*

Актуальной задачей для многих предприятий жилищно-коммунального хозяйства, нефтегазохимического и топливно-энергетического комплекса, использующих в своих технологических процессах насосы, вентиляторы и компрессоры, является повышение скорости вращения этих турбомеханизмов. Довольно часто получение повышенных скоростей вращения является актуальной задачей как для устройств автоматики, так и для специальной техники.

С целью повышения скорости вращения в [1 – 3] разработаны конструкции синхронных двигателей (СД) с количеством фаз обмотки статора от одного до шести, реактивным ротором и неподвижной обмоткой возбуждения переменного тока, которая находится в промежутке между ротором и статором. За счет применения этих конструкций может быть получена удвоенная по сравнению с серийно выпускаемыми двигателями переменного тока скорость вращения 6000 об/мин. В [1 – 3] описано устройство и рассмотрен принцип действия этих двигателей, однако не проведен анализ особенностей формирования элект-

Секция 5

тромагнитного момента, а также влияния обмотки возбуждения на этот процесс.

Математическое описание процессов в СД с количеством фаз обмотки статора от одного до шести, реактивным ротором и неподвижной обмоткой возбуждения переменного тока имеет вид:

$$i_k = I_m \sin(\beta + \delta - (k-1)\Delta\beta); k = 1, \dots, 6;$$

$$\delta = \frac{3\pi}{4}; \Delta\beta = \frac{\pi}{m};$$

$$i_f = I_{fm} \sin(\beta + \gamma);$$

$$\gamma = \pi \frac{m+2}{4m};$$

$$\frac{d\Lambda_k}{d\alpha} = \Lambda_m \sin(\alpha + \pi - (k-1)\Delta\alpha);$$

$$\alpha = 2\beta = 2\omega t; \Delta\alpha = \frac{2\pi}{m};$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \frac{d\Lambda_k}{d\alpha (i_k w + i_f w_f)^2};$$

$$M_o = c_1 \Lambda_m (I_m w + I_{fm} w_f)^2 \text{ при } m = 1;$$

$$M_o = c_1 \Lambda_m (I_m w)^2 + c_2 \Lambda_m I_m w I_{fm} w_f \text{ при } m = 2, \dots, 6;$$

где m – количество фаз обмотки статора; δ – начальная фаза тока для первой фазы статора; $\Delta\beta$ – угол сдвига по фазе между токами фаз статора; γ – начальная фаза тока возбуждения; Λ_k – магнитная проводимость между ротором и k -ым магнитопроводом; α – угол поворота ротора; ω – угловая частота питающих напряжений; $\Delta\alpha$ – угол между осями фаз статора; w , w_f – числа витков фаз обмотки статора и обмотки возбуждения; M – электромагнитный момент; M_o – среднее значение момента; c_1 , c_2 – коэффициенты для вычисления среднего момента.

На основании рассмотренного математического описания проведен расчет зависимостей токов фаз обмотки статора и тока

Секция 5

обмотки возбуждения СД с количеством фаз обмотки статора от одного до шести, а также расчет моментных характеристик этих двигателей. При расчетах принимались следующие значения параметров: $w = 100$; $I_m = 10$ А; $w_f = 20$; $I_{fm} = 10$ А; $\Lambda_m = 0,0026$ Гн.

Результаты расчета для СД с $m = 1, 3, 6$ приведены на рис. 1–6.

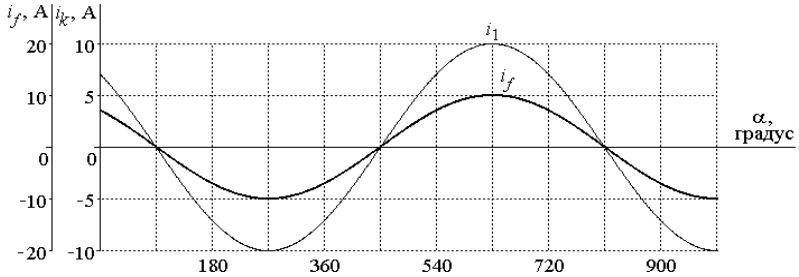


Рис. 1. Зависимости токов СД с $m = 1$

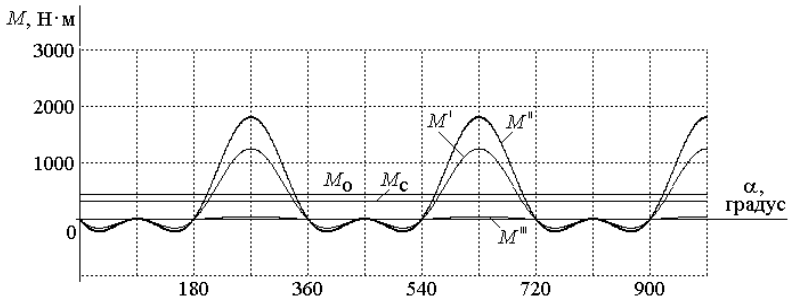


Рис. 2. Моментные характеристики СД с $m = 1$

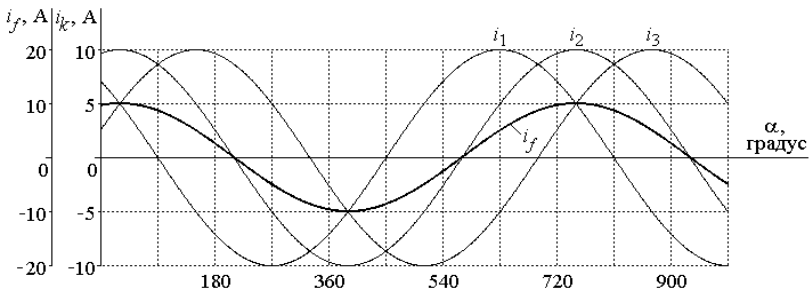


Рис. 3. Зависимости токов СД с $m = 3$

Секция 5

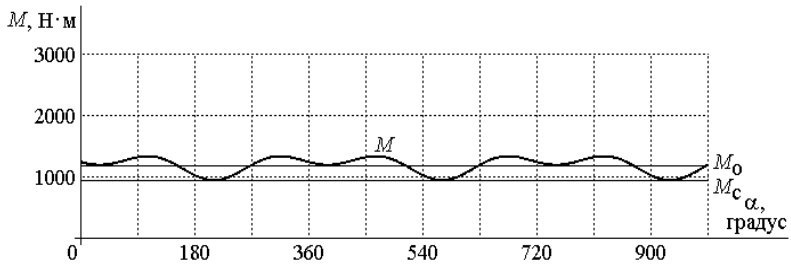


Рис. 4. Моментные характеристики СД с $m = 3$

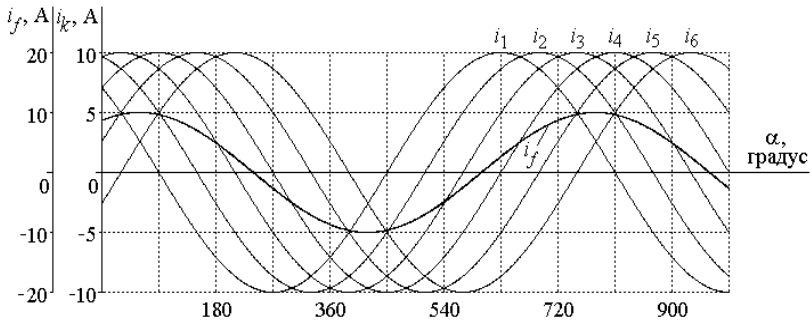


Рис. 5. Зависимости токов СД с $m = 6$

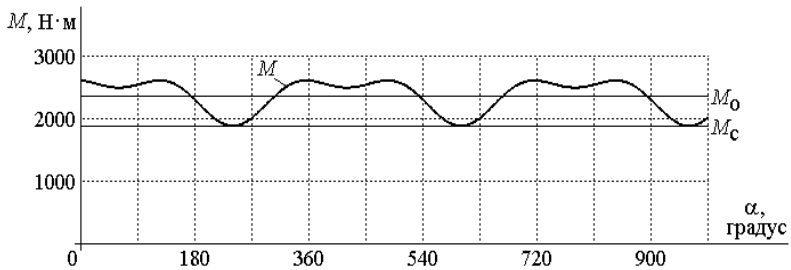


Рис. 6. Моментные характеристики СД с $m = 6$

На моментных характеристиках используются следующие обозначения: M_c – электромагнитный момент без обмотки возбуждения; M – электромагнитный момент, формируемый при наличии обмотки возбуждения; M_o – среднее значение электромагнитного момента с обмоткой возбуждения.

Кроме того на рис. 2 введены обозначения: M^I – электромагнитный момент без обмотки возбуждения; M^{II} – электромагнитный момент с обмоткой возбуждения; M^{III} – электромагнитный момент, создаваемый обмоткой возбуждения.

Анализ результатов расчета зависимостей токов обмотки статора и тока возбуждения показывает, что на характер этих кривых существенное влияние оказывает угол сдвига по фазе между токами фаз статора $\Delta\beta$, а также начальная фаза тока возбуждения γ . Очевидно также, что с увеличением m наблюдается более плотное расположение кривых фазных токов обмотки статора. Анализ моментных характеристик показывает, что без обмотки возбуждения при любом количестве фаз обмотки статора электромагнитный момент является величиной постоянной. Сравнительный анализ моментных характеристик показывает, что с увеличением количества фаз обмотки статора m наблюдается увеличение электромагнитного момента и среднего значения момента. Расчетные средние значения момента СД с количеством фаз обмотки статора от одного до шести сведены в таблицу.

Таблица

Расчетные средние значения момента

m	1	2	3	4	5	6
c_1	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75
c_2	0	0,354	0,5	0,653	0,809	0,966
Средние значения момента СД без обмотки возбуждения						
M_c , Н·м	312,5	625	937,5	1250	1562,5	1875
Средние значения момента СД с обмоткой возбуждения						
M_0 , Н·м	450	801,775	1187,5	1576,64	1967,01	2357,965
Увеличение момента, %	44	28,284	26,667	26,131	25,889	25,758

Результаты расчета в виде моментных характеристик и данные таблицы показывают, что применение обмотки возбуждения при любом m приводит к увеличению электромагнитного момента и среднего значения момента. Как видно из таблицы,

наличие обмотки возбуждения позволяет существенно увеличить среднее значение момента. Так при $m = 1$ увеличение составляет 44%, а по мере возрастания m от двух до шести увеличение момента составляет от 28,284 % до 25,758 %.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) в СД с количеством фаз обмотки статора, равном единице, формирование электромагнитного момента возможно только за счет тока в обмотке возбуждения даже при отсутствии тока в обмотке статора;

2) применение обмотки возбуждения эффективно и целесообразно при любом количестве фаз обмотки статора, поскольку приводит к увеличению электромагнитного момента;

3) наибольший момент развивает СД с шестифазной обмоткой статора и обмоткой возбуждения переменного тока;

4) очевидно, что с точки зрения применения в различных отраслях промышленности наиболее целесообразно использование СД с шестифазной обмоткой статора, реактивным ротором и неподвижной обмоткой возбуждения переменного тока.

Отметим, что применение СД с шестифазной обмоткой статора целесообразно еще и потому, что его питание можно осуществлять от трехфазной сети. При этом при $m = 2, 4, 5$ для питания обмотки статора необходимо использовать специальные источники напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2757423. Синхронный электродвигатель: № 2021108829: заявл. 01.04.2021: опубл. 15.10.2021 / А.Ю. Афанасьев, В.Г. Макаров, А.А. Петров, Р.Р. Кильдияров; заявитель, патентообладатель Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. – 11 с.

2. Патент № 2757459. Синхронный электродвигатель: № 2021106646: заявл. 15.03.2021: опубл. 18.10.2021 / А.Ю. Афанасьев, В.Г. Макаров, А.А. Петров, С.В. Игнаев; заявитель, патентообладатель Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. – 10 с.

3. Патент № 2761085. Синхронный электродвигатель: № 2021110275: заявл. 13.04.2021: опубл. 03.12.2021 / А.Ю. Афанасьев, В.Г. Макаров, А.А. Петров, П.Е. Круглов; заявитель, патентообладатель Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. – 13 с.

Авторы:

Афанасьев Анатолий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электрооборудования, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ». Окончил приборостроительный факультет Казанского авиационного института в 1963 году. Ученую степень доктора технических наук получил в 1998 году, защитив диссертацию на тему «Моментный электропривод систем управления». E-mail: afanasiev_eo@mail.ru.

Макаров Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Электропривода и электротехники, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Окончил факультет управления и автоматизации Казанского государственного технологического университета в 1994 году. Ученую степень доктора технических наук получил в 2011 году, защитив диссертацию на тему «Асинхронный электропривод электромеханической систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения». E-mail: electroprivod@list.ru.

Игнаев Станислав Владимирович, магистрант кафедры Электрооборудования, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ». Окончил магистратуру института автоматики и электронного приборостроения Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ в 2023 году. E-mail: ignaev99@gmail.com.

**ВЛИЯНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНИ
ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
МЕХАНИЗМОВ НА ПЕРСОНАЛ И АНАЛИЗ
ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКЛЮЧЕНИЯ**

**Шалимов А.В., Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М.,
Снигур А.**, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Аннотация. В работе было предложено наглядное представление основных параметров участвующих при выборе категории надежности, они отражены в виде вспомогательной степени ответственности механизмов (ВСОМ) приписанных к уже известной клас-

сификации категорий надежности. В результате анализа потребителя составляется вспомогательная категория надёжности, характеризующие конкретный объект и наглядно отражают причину выбора именно такой категории.

Ключевые слова: *надежность, факторы выбора категории надежности, вспомогательная степень ответственности механизма.*

Введение

Актуальность работы обуславливается необходимостью наглядного представления факторов, влияющих на выбор категории надежности, для наиболее точного информирования обслуживающего персонала об объекте пребывания, а также для возможной оценки важности объекта в работах, связанных с последствиями отключений и их материальной составляющей.

Как показывает современное состояние развития инфраструктуры электрических сетей и степени сложности в реализации схемных решений для систем электроснабжения в промышленных и городских условиях наблюдается две основные тенденции, связанные с ростом электрической нагрузки и необходимостью проведения оптимальной реконструкции, а также износ электрооборудования и выход из строя в результате повышенных нагрузок и отсутствием возможности модернизации в действующих условиях. Таким образом, возникает необходимость учета степени ответственности механизмов в действующих условиях эксплуатации, а не на стадии проектируемого объекта. Соответственно системы релейной защиты и автоматики должны обеспечивать селективность и быстрое время срабатывания без простоев и финансовых потерь, связанных со снижением объемов производства. В этой статье предлагается к обозначениям известных групп надежности электроснабжения добавить ВСОМ для получения более полной и достоверной информации об электроприемнике (ЭП), с которым работает действующий персонал.

Напомним, что согласно ПУЭ, существует три категории электроприемников, соответственно I-я, II-я и III-я, которые предназначены для оценки надежности ЭП и характеризуют продолжительность бесперебойной работы, повреждаемость оборудования, ущерб от отключения электроснабжения этого ЭП и другие факторы.

Основная часть

Исходя из категории надежности электроснабжения (КНЭ) выделим основные факторы, влияющие на выбор конкретной категории. Далее для каждого объекта покажем, насколько сильно эти факторы повлияли на выбор той или иной категории для объекта электроснабжения.

Основные факторы:

- Угроза человеческой жизни;
- Угроза безопасности государства;
- Материальный ущерб;
- Нарушение технологического процесса.

Все эти критерии непосредственно влияют в той или иной степени на выбор КНЭ. Один из факторов может оказать более существенное влияние на итоговый выбор КНЭ, например: если отключение питания какого-либо объекта электроснабжения не приносит угрозу человеческой жизни и не приносит большого материального ущерба, но отключение питания является угрозой безопасности государства, этому объекту присваивается категория I.

Исходя из вышесказанного, имеет смысл добавить литеры к обозначению КНЭ, для удобства персонала и обслуживающих организаций, которые помогут более полно оценить значимость объекта и последующие операции на нем.

Обозначим выделенные факторы буквами:

- А – Угроза человеческой жизни;
- Б – Материальный ущерб;
- В – Нарушение технологического процесса;
- Г – Угроза безопасности государства.

Далее рассмотрим каждый фактор и создадим для него деление по важности этого критерия.

Стоит отметить, что КНЭ присваивается на стадии проектирования предприятия или же нового объекта, возводимого на работающем предприятии, поэтому весь дальнейший расчет будет основываться только на проектных данных и исходящих из них выводах.

В I-й и особой категории фигурирует угроза человеческой жизни, литера «А», также для большей информативности разделим этот критерий на два:

Секция 5

«А» – угроза жизням более чем 50 человек;

«а» – угроза жизни менее чем 50 человек;

« » – угрозы жизням людей нет.

Материальный ущерб, фигурирующий в описании I-й и II-й КНЭ, опишем литерой «Б», для его оценки стоит ввести ещё несколько критериев «Б», «б'», «б» и « ».

Оценивая материальный ущерб, стоит сказать, что при проектировании мы не можем точно оценить ущерб, только примерно, зная количество выработки на будущем предприятии или, если предприятие уже работает, знаем связь нововозводимого объекта с технологией предприятия и знаем выработку предприятия, исходя из этого, будем учитывать возможный недоотпуск продукции, возможные затраты на ликвидацию последствия паузы электроснабжения и возможные затраты, обусловленные восстановлением технологического процесса цехов и объектов, связанных технологией с описываемым объектом.

Также при расчете материального ущерба можно учитывать, что электроустановки относятся к категории объектов с высокой степенью опасности и им может присваиваться дополнительный коэффициент от поражения электрическим током при расчете ущерба.

Критерий «Б» укажем для ущерба более 75% от прибыли предприятия за время простоя ЭП.

Укажем:

«Б» – (75% и более);

«б'» – (50%-75%);

«б» – (25%-50%);

« » – (0-25%).

Для оценки материального ущерба воспользуемся формулой:

$$\frac{У}{П} \cdot 100\% = К, \%,$$

где У – возможные убытки предприятия от недоотпуска продукции, учитывая финансы затраченные на ликвидацию последствия паузы электроснабжения и затраты, обусловленные восстановлением технологического процесса цехов и объектов, связанных технологией с описываемым объектом за 1 сутки, тыс. руб.;

П – реальная или возможная прибыль предприятия за период простоя за сутки, тыс. руб.;

К – процент убытков предприятия от произошедшей аварии.

В данной статье не идёт речь о методике определения убытков поэтому, приведена общая методика, которая в зависимости от принятого на предприятии вида расчета, может быть выбрана своя.

Применив данную формулу, можем выбрать литеру для материального ущерба.

Рассмотрим фактор нарушение технологического процесса, который фигурирует в определении I-й, II-й и по сути III-й категории. Для него используем букву «В», и разделим на «В», «в», « »:

«В» – 1-я степень. Расстройство сложного технологического или угроза существует угроза взрывов и пожаров;

«в» – 2-я степень. Массовые простои механизмов, рабочих и промышленного транспорта или сильный ущерб деятельности городских и сельских жителей;

« » – 3-я степень. Незначительное нарушение нормальной деятельности производства или городских и сельских жителей.

Если нарушение технологического процесса попадает под несколько категорий указывается наиболее значимая, то есть по значимость от «В» – самой значимой до « » – менее значимой.

И последний критерий, о котором говорится только в Особой группе электроснабжения, это угроза государственной безопасности, здесь введем букву «Г» и её разделим на «Г» и « »:

«Г» – есть угроза государственной безопасности;

« » – нет угрозы государственной безопасности.

Исходя из предложенных критериев составим таблицу для удобства их применения.

Приведем обобщённый пример, по проекту объект получил I-ю категорию надежности. Далее по технологии выяснено, что последствия отключения этого ЭП не приводят к угрозам жизни людей. Приводит к массовым простоям механизмов и людей. Отключение грозит государственной безопасности. Также вероятный материальный ущерб составляет около 65%. Следовательно, категорию электроснабжения с соответствующей ВСОМ можно записать так: I (б'вГ).

Выводы

Предложенная идея может быть актуальна для людей, работающих по вызову на аварию или ремонт (например: аварийная служба) для представления об объекте, на который они прибыли, также будет полезна для молодых специалистов для ознакомления с важностью рассматриваемых объектов. Помимо этого, данная идея может найти применение для оценки ущерба после произошедшей аварии, что позволит оценить как сам возможный ущерб в денежном эквиваленте, сколько угрозу для последующего развития аварии.

Также в перспективе доработать надстройку на алгоритм ВСОМ, для удобства проектирования объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ровенских, М.В.* Исследование категории надежности производственной системы предприятия / М.В. Ровенских // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: XVII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, Старый Оскол, 15–16 декабря 2020 года. – Старый Оскол: Старооскольский технологический институт (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2021. – С. 501–506. – EDN GFQQEP.

2. *Рыбаков, В.В.* Актуальные проблемы учета требований к надежности электроэнергетической системы при построении системы электроснабжения специальных объектов / В.В. Рыбаков, Н.Е. Пешехонов, А.Е. Воронин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 392-398. – EDN YRBILR.

3. *Ефимов, А.Ю.* Оценка надежности электроснабжения потребителей первой и второй категории / А.Ю. Ефимов, А.О. Алехин // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 2. – С. 74-84. – DOI 10.46960/2658-6754_2019_2_74. – EDN NDKWCP.

4. *Берхане, А.М.* Обоснование критерия оценки надежности электроснабжения / А.М. Берхане // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 1(26). – С. 59. – DOI 10.15862/106TVN115. – EDN UBGSBX.

5. *Карпов, В.В.* Оценка экономических ущербов коммерческих потребителей с учетом надежности электроснабжения / В.В. Карпов, И.В. Вдовин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 4(38). – С. 128-135. – EDN SQSRTB.

6. *Абдылдаев, Р.Н.* Анализ нормирования надежности электрооборудования / Р.Н. Абдылдаев, Ж.О. Кулуев, Э.А. Абсаматов // Известия Ошского технологического университета. – 2021. – № 1. – С. 25-28. – EDN OXQFMM.

7. *Кондрашова Ю.Н.* Обзор причин и оценка ущерба от простоя электрооборудования на примере стана 2500 горячей прокатки ЛПЦ-4 / Ю.Н. Кондрашова, А.М. Третьяков, А.В. Шалимов, А.М. Маркина // Энергетические и электротехнические системы: Международный сборник научных трудов. Том Выпуск 8. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 27-33. – EDN NGCYXM.

Авторы:

Кондрашова Юлия Николаевна, см. стр. 201.

Шалимов Алексей Витальевич, см. стр. 201.

Третьяков Андрей Максимович, см. стр. 202.

Снигур Артем, см. стр. 201.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА

Леуткин А.А., Симонов Б.Ф., Кордубайло А.О., Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье предложен метод увеличения энергетической эффективности системы питания и управления электромагнитного молота для скважинного виброисточника. Для упрощения конструкции силовой части системы питания вместо тиристоров использованы транзисторы в сочетании с импульсными диодами. Система управления обеспечивает быстрый вывод отключаемой катушки из работы, снижая потери мощности и нагрев элементов силовой схемы.

Ключевые слова: электромагнитный молот, скважинный виброисточник, транзистор, диод, система питания и управления, переходные процессы.

Скважинный виброисточник

Скважинный импульсный электромагнитный виброисточник предназначен для вибровоздействия на нефтяные пласты [1,

2]. Виброволновая обработка месторождений позволяет увеличить приток нефти к добывающей скважине и снизить обводнённость запасов за счёт вовлечения в контур нефтености слабо дренируемых участков коллектора [3]. Анализ опыта промысловых работ по вибровоздействию на продуктивные пласты показывает, что положительный эффект от такого воздействия может сохраняться до пяти-шести месяцев [2]. Разработанный в ИГД СО РАН скважинный виброисточник на основе линейного электромагнитного ударного двигателя предназначен для работы на глубине (1-3 км). При этом его система питания и управления (далее СПУ) располагается на дневной поверхности и связана с источником кабелем. Конструктивно источник состоит из двух силовых элементов, электромагнитного молота между ними и вспомогательных гидравлических систем. Силовые элементы предназначены для закрепления виброисточника в обсадной колонне скважины на рабочей глубине и передачи силовых импульсов от молота в нефтяной пласт. Электромагнитный молот включает верхнюю и нижнюю силовые катушки, под действием электромагнитных сил которых перемещается боёк [4, 5].

Конструкция системы питания и управления

СПУ молота состоит из управляемого мостового трёхфазного тиристорного выпрямителя, ёмкостного фильтра и силового триггера. Управляемый выпрямитель использован в связи с необходимостью питать катушки молота виброисточника различным уровнем тока. Ёмкостный фильтр сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, превращая его в постоянное. Силовой триггер переключает питание катушек в зависимости от крайних положений бойка молота. Блок-схема СПУ приведена на рис. 1.

Общая точка катушек имеет высокий потенциал (клемма «+»). Клемма линии верхней катушки обозначена «K1», линия нижней катушки – «K2». При переключении катушек, энергия выброса напряжения в отключаемой катушке расходуется на цепи гашения (C_g , R_g). Тиристоры VS7 и VS8 – полууправляемые, для их своевременной коммутации применяется ёмкость S_k . Эта конструкция силового триггера имеет два недостатка: потери мощности на цепи гашения при отключении катушек и

большая масса устройства из-за применения габаритных и тяжёлых металлобумажных конденсаторов.

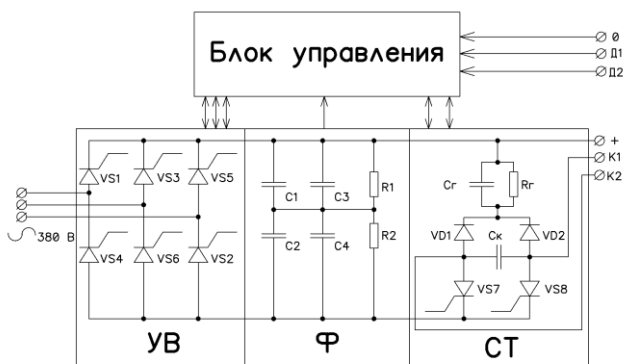


Рис. 1. Схема СПУ. Здесь: УВ – управляемый выпрямитель, Ф – ёмкостной фильтр, СТ – силовым триггер

Цель работы – разработать силовой триггер с увеличенной энергоэффективностью за счёт перехода остаточной энергии катушки, выводимой из работы, в тепловую энергию, выделяющуюся на активном сопротивлении самой катушки и силового кабеля.

Для выполнения поставленной задачи, тиристоры $VS7$ и $VS8$ следует заменить на $IGBT$ -транзисторы $VT1$ и $VT2$ со встроенными диодами. Диоды $VD1$ и $VD2$ должны быть быстродействующими. Применение транзисторов вместо тиристоров позволит отказаться от использования коммутирующей ёмкости C_k и снизить мощность, потребляемую управляющими цепями [6], а переход остаточной энергии в тепловую энергию устраняет необходимость использования цепи гашения C_r - R_r . Блок-схема нового варианта СПУ показана на рис. 2.

Кроме снижения массы и габаритов конструкции, такое решение позволяет не оснащать диоды и транзисторы снабберными цепями, повышающими потери мощности на переключение и ухудшающими тепловой режим силовых ключей [7].

Моделирование в MATLAB Simulink

Для сравнения возможностей новой конструкции силового триггера и его исходного варианта, создана модель в программном пакете *MATLAB Simulink*. Блок-схема модели представлена на рис. 3.

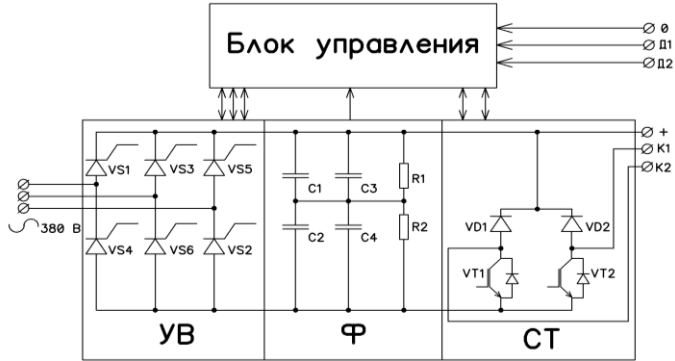


Рис. 2. Схема предлагаемой СПУ. Здесь: УВ – управляемый выпрямитель, Ф – ёмкостной фильтр, СТ – силовой триггер. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ имеют встроенные диоды

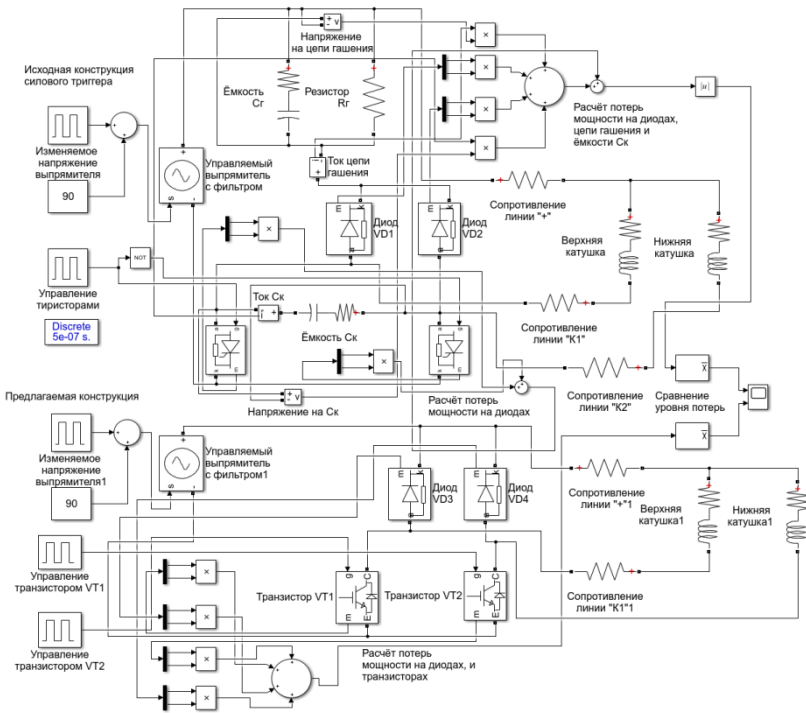


Рис. 3. Блок-схема для сравнительных испытаний моделей силового триггера

Секция 5

С учётом падения напряжения на активном сопротивлении кабеля, питающего катушки, напряжение, подаваемое на общую точку катушек при включении верхней катушки, составляет 120 В. При работе нижней катушки напряжение питания составляет 90 В. В модели учтено сопротивление кабеля питания молота при длине 1 км.

Осциллограммы средней мощности потерь приведены на рис. 4.

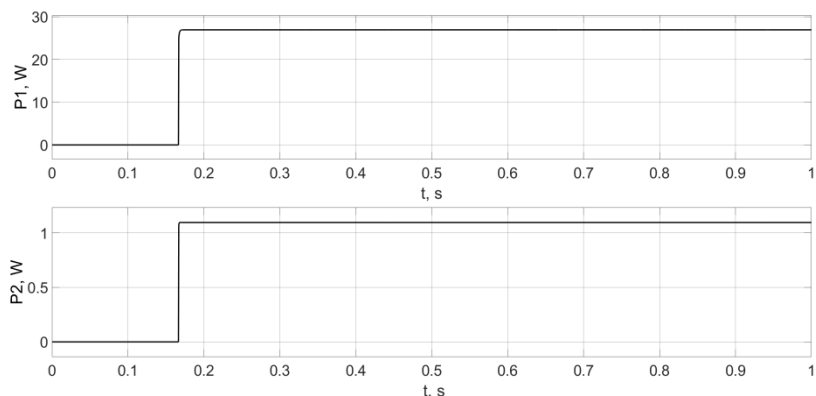


Рис. 4. Осциллограммы средней мощности потерь, выделяющейся на элементах силового триггера. Здесь: P_1 – средняя мощность потерь, выделяемая элементами силового триггера исходной конструкции, P_2 – средняя мощность потерь, выделяющаяся на элементах триггера предлагаемой конструкции

Как следует из представленных осциллограмм, предложенное изменение конструкции силового триггера СПУ позволило значительно снизить мощность тепловых потерь на его элементах.

Выводы

Ключевой особенностью новой конструкции СПУ скважинного виброисточника является перевод остаточной энергии катушки, выводимой из работы, в тепловую энергию, выделяемую на активном сопротивлении кабеля. Это позволило улучшить температурный режим элементов в корпусе СПУ, поскольку выделяемая энергия расходуется на нагрев элементов, находящихся за пределами СПУ. Применение IGBT-транзисторов и быстро-

действующих диодов в составе силового триггера вместо тиристоров позволяет снизить тепловую мощность, выделяемую на его полупроводниковых элементах, в 25 раз. Дополнительное снижение мощности, выделяемой триггером, достигается благодаря исключению из конструкции снабберных цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Симонов Б.Ф.* Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Н. Опарин, А.О. Кордубайло, В.И. Востриков. – ГИАБ. – 2019. – № 8. – С. 180–189.
2. *Симонов Б.Ф.* Технология объёмного волнового воздействия на нефтегазовые залежи для повышения углеводородоотдачи пластов / Б.Ф. Симонов, Е.Н. Чердников, С.В. Сердюков и др. – Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 4. – С. 42–44.
3. *Симонов Б.Ф.* Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
4. *Курленя М.В.* Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения / М.В. Курленя, В.И. Пеньковский, А.В. Савченко и др. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 3. – С. 62–71.
5. *Симонов Б.Ф.* Анализ спектрального состава излучения скважинного импульсного виброисточника / Б.Ф. Симонов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 74–83.
6. *Коробков Д.В.* Основы преобразовательной техники (курс лекций) / Д.В. Коробков. – Новосибирск: НГТУ, 2020 г. – 90 с.
7. *Семёнов Б.Ю.* Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю. Семёнов. – 2-е изд. испр. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 416 с.: ил.

Авторы:

Леуткин Александр Аркадьевич, инженер отдела Горной и строительной геотехники ИГД СО РАН. Образование – НГТУ, факультет РЭФ 2023 г. E-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru.

Симонов Борис Ферапонтович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, г.н.с. отдела Горной и строительной геотехники ИГД СО РАН. Образование – НЭТИ, 1972 г., факультет ФЭТ. Учёная степень 1990 г. «Создание электромагнитных молотов для строительства морских платформ». E-mail: Simonov_bf@mail.ru.

Кордубайло Алексей Олегович, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела Горной и строительной геотехники ИГД СО РАН. Образование – СГУПС, факультет УТТК 2017 г. Учёная степень 2021 г. «Обоснование параметров и разработка скважинного электромагнитного импульсного виброисточника». E-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru.

ОБСЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКА ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА SFRA

Александров Н.М., НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия
Хренников А.Ю., НТЦ ФСК ЕЭС, г. Москва, Россия

Аннотация: В статье приведены формулы расчета показателей для численного сравнения нормограмм и дефектограмм. Также приведен пример анализа обмотки силового трансформатора с наличием деформации обмотки в результате испытания его на электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания.

Ключевые слова: трансформатор, деформация, частотный отклик, SFRA, диагностика, интерпретация.

Введение

Силовые трансформаторы являются одними из наиболее важных устройств, установленных на объектах генерации, передачи и распределения электроэнергии. Механические деформации обмоток трансформаторов приводят к их повреждению и, соответственно, вызывают перебои в электроснабжении потребителей. Механические деформации в основном являются следствием электромагнитных сил, воздействующих на обмотки трансформатора во время коротких замыканий [1,2]. В случае значительных деформаций возможно последующее внутреннее электрическое повреждение в виде виткового замыкания. Ремонт такого трансформатора требует значительного времени и усилий, а также больших финансовых затрат из-за времени вывода из работы и стоимости самого ремонта. Повреждения силовых трансформаторов также могут иметь серьезный негатив-

ный эффект на окружающую среду, например, пожар или разлив трансформаторного масла.

Надежное определение механических повреждений в силовых трансформаторах вследствие деформации обмоток требует применения чувствительного метода определения этого типа повреждения. Метод частотного анализа (SFRA) является наиболее чувствительным к любым изменениям в конструкции обмотки. Изменение геометрических размеров обмотки изменяет частотную характеристику (SFRA). Данный диагностический метод является сравнительным, и интерпретация результатов происходит путем сравнения нормограмм и дефектограмм, снятых до и после воздействия токов КЗ.

В статье приведены формулы расчета показателей для численного сравнения нормограмм и дефектограмм. Также приведен пример анализа обмотки силового трансформатора с наличием деформации обмотки в результате испытания его электродинамической стойкости.

Методы статистического анализа для сравнения откликов

При проведении анализа и интерпретации отклика силового трансформатора применяются статистические показатели для оценки различий между двумя откликами. Это позволяет получить численный результат, вместо визуального сравнения двух графиков.

Наибольшее распространение получил коэффициент корреляции (КК) (в некоторых публикациях применяется термин коэффициент кросс-корреляции). КК позволяет сравнивать 2 набора данных, и при полном совпадении 2-х характеристик КК равно 1. Значение КК уменьшается с увеличением различий между двумя характеристиками. КК рассчитывается по формуле:

$$KK = \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i и y_i – i значения наборов данных x и y (в дБ), а \bar{x} и \bar{y} – средние значения; x и y – наборы данных откликов для первого и второго измерения соответственно.

Недостатком КК является то, что данный коэффициент имеет низкую чувствительность при сравнении характеристик, имеющих схожую форму, но отличающихся значением уровня. Данный недостаток предлагается исключить с помощью применения другого показателя, а именно модулем суммы логарифмической ошибки (ASLE), который рассчитывается по формуле:

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{N}.$$

Идеальное совпадение характеристик соответствует нулевому значению коэффициента, и значение увеличивается с увеличением различий между характеристиками откликов. У данного показателя нет ограничений, поэтому значение может быть больше 1.

Исследование частотной характеристики силового трансформатора

Для примера интерпретации результатов в данной публикации использованы частотные характеристики трансформатора ТДЦ-400000/220, полученные путем дискретного преобразования Фурье откликов, полученных методом низковольтного импульса, при испытаниях на электродинамическую стойкость к токам КЗ данного трансформатора. Результаты НВИ для фазы С представлены на рис. 1.

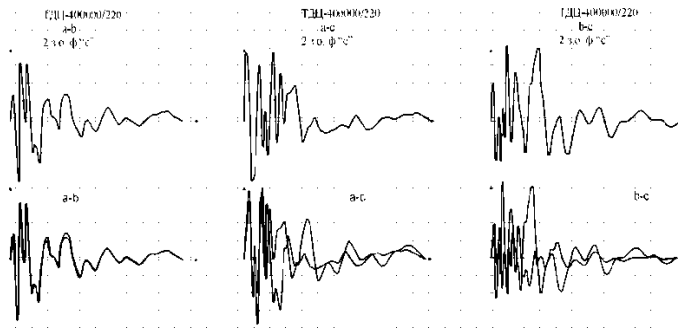


Рис. 1. Результаты НВИ фазы С трансформатора ТДЦ-400000/220

Осциллограмма НВИ представляет собой зависимость уровня отклика от времени. Для целей анализа частотного отклика необходимо перевести данную временную характеристи-

Секция 5

ку в частотную. Для этого применяется дискретное преобразование Фурье.

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k), \quad k = 0 \dots N-1.$$

Дискретное преобразование Фурье N отсчетов сигнала $s(n)$, $n = 0 \dots N-1$ (в общем случае комплексного) ставит в соответствие N комплексных спектральных отсчетов $S(k)$, $k = 0 \dots N-1$. Характеристики частотного отклика после преобразования Фурье представлены на рис. 2.

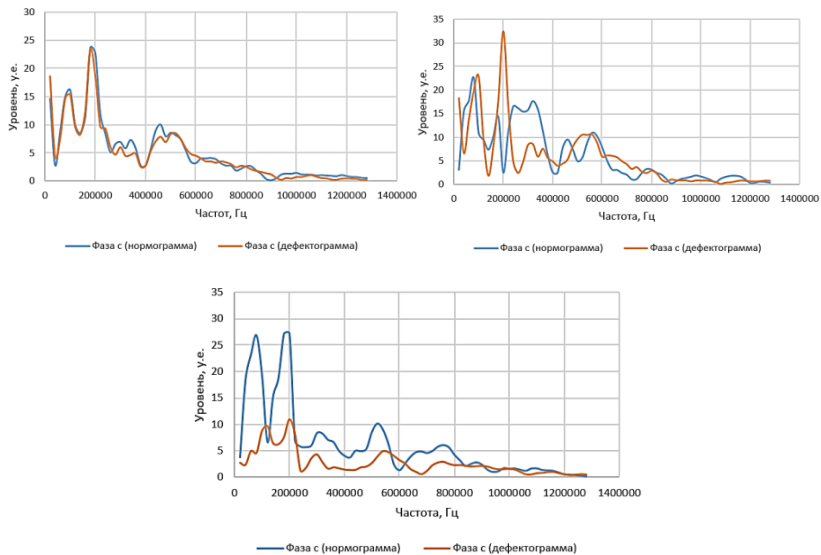


Рис. 2. Частотные характеристики фазы С по схеме а-в, а-с, в-с

В результате 2-го зачетного опыта КЗ обмотки НН фазы «С» трансформатора произошло повреждение обмотки. Аналогичные КЗ происходят во время эксплуатации силовых трансформаторов. После разборки трансформатора на территории завода-изготовителя деформации обмотки фазы С после опытов КЗ были задокументированы и сфотографированы (рис. 3). На фотографиях можно наблюдать начало потери радиальной устойчивости трансформатора.

Секция 5

В результате исследования откликов было установлено следующее:

- Характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм отличаются;
- Частоты резонанса сдвинуты друг относительно друга в некоторых случаях на величину до 80 кГц.

Значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса:

- увеличение на 60 % на частоте 200 кГц;
- уменьшение на 50 % на частотах 300 кГц и 350 кГц.

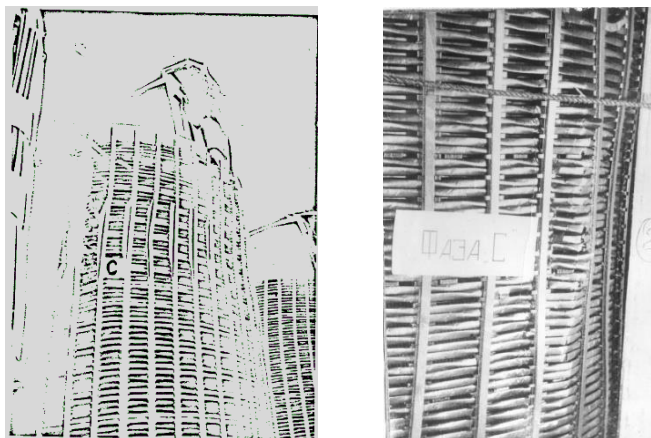


Рис. 3. Фаза С после испытаний на электродинамическую стойкость (начало потери радиальной устойчивости)

В ходе опытов короткого замыкания эти деформации подтверждались измерением сопротивления короткого замыкания (X_k), суммарное отклонение которого от базового после 5 зачетных опытов составило на фазе «С» + 1,6 %

Результаты разборки показали, что на фазе «С» произошло смещение столбов прокладок на наружном слое равномерно от середины по ходу винта в верхней части от 0 до 60 мм, в нижней части от 0 до 10 мм.

В нескольких местах катушки имеют выпуклость в прилегающий канал НН-ВН от 20 до 30 мм и от 5 до 10 мм внутрь с повреждением бумажной изоляции.

Секция 5

Общая ширина деформируемых витков 140 мм. В полях 18, 19, 20, 21 и 22 имеется осевая деформация витков от середины обмотки к верху до 15 мм. Осевая деформация сопровождается началом потери радиальной устойчивости.

Показатели коэффициент корреляции и ASLE (таблица) наглядно демонстрируют наличие повреждений в фазе С трансформатора.

Таблица

Расчет показателей исследования фазы С

	Фаза С a-b	Фаза С a-c	Фаза С b-c
КК	0,982	0,541	0,731
ASLE	0,046	0,195	0,23

Приведенный пример анализа частотных характеристик силового трансформатора с потерей радиальной устойчивости обмотки показывает, что для данного вида повреждения обмотки, а именно осевой деформации и началом потери радиальной устойчивости, основные изменения характеристики произошли в диапазоне частот от 200 до 350 кГц, что коррелируется как со стандартом МЭК 60076-18, так и с опубликованными результатами исследования других трансформаторов, указанных в таблице.

Выводы

Анализ нормативной документации, приведенной в статье показывает, что в настоящий момент нет точного понимания по интерпретации результатов исследования состояния обмоток силовых трансформаторов методом частотного анализа (SFRA). Такой же вывод можно сделать из анализа публикаций, в которых приводятся реальные случаи исследования поврежденных трансформаторов с последующей локализацией места и причины повреждения.

Результаты исследования трансформатора ТДЦ-400000/220 показали, что любое изменение частотного отклика (SFRA) соответствует значительным деформациям обмоток, в ходе которых происходит изменение не только емкостных, но и индуктивных связей между катушками и витками обмотки.

Как показано выше на примере диагностики состояния обмоток трансформатора между опытами КЗ применение анализа

частотного является достаточно эффективным. Данный метод чувствителен к небольшим изменениям межвитковых и межкатушечных емкостей и индуктивностей обмотки трансформатора. Вывод о появлении деформаций делается путем сравнения нормограмм, снятых на неповрежденном трансформаторе, и дефектограмм, снятых после КЗ. Изменение частотного спектра дефектограммы при выявленных повреждениях соответствуют данным нормативной документации и других публикаций.

Применение расчётных численных показателей для анализа частотных откликов позволяет упростить процедуру анализа и сделать её более наглядной. Расчёт значения показателей в разных частотных диапазонах позволит сделать предварительный анализ о месте и типе возможного повреждения обмотки.

Требуются дальнейшие исследования для разработки универсального метода интерпретации результатов анализа обмоток силовых трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика, 2006. № 12. С. 12–14.
2. Дробышевский А.А. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов и современные способы оценки механического состояния обмоток / Семинар «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». ПЭИПК. 3–7 июля 2006 г., Санкт-Петербург.
3. IEC 60076-18 Ed.1: Power transformers - Part 18, «Measurement of frequency response», 2012.
4. «IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers», IEEE Std C57.149-2012, pp. 1-72, 2013.
5. Sultanbek A. Exploring Statistical Index Criteria for Transformer Frequency Response Interpretation, December 2018.

Авторы:

Александров Николай Михайлович, кандидат технических наук, начальник отдела первичного оборудования НПП «Динамика». E-mail: nickdynamics@gmail.com.

Хренников Александр Юрьевич, см. стр. 130.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

Шатунов С.Н., Тумаева Е.В., Нижнекамский химико-технологический институт, г. Нижнекамск, Россия

***Аннотация.** В данной статье предложен способ повышения энергоэффективности взаимосвязанных электроприводов с рекуперацией энергии. Представленный вариант частотно-регулируемого электропривода позволяет добиться повышения энергоэффективности при использовании рекуперированной энергии электропривода.*

***Ключевые слова:** многодвигательный электропривод, взаимосвязанные электропривода с рекуперацией энергии, частотно-регулируемый электропривод, кордная линия, производство автошин.*

Рассмотрим возможности получения бесплатной электроэнергии. Для этого можно использовать электродвигатели. Любая электрическая машина обратима, то есть мы можем электродвигатель превращать в генератор. На сегодняшний день в мире больше всего используются асинхронные двигатели переменного тока в составе электроприводов. Они просты по конструкции и надёжны.

Асинхронный электродвигатель переходит в генераторный режим работы, когда частота вращения его ротора становится выше частоты вращающегося магнитного поля статора. Это происходит в тормозных режимах работы электропривода и называется также рекуперацией. Энергию рекуперации можно запасать в аккумуляторных батареях с целью дальнейшего использования, либо сразу использовать для питания других приёмников.

Энергию рекуперации сегодня успешно применяют в электромобилях, электросамокатах и т.д. В данном случае энергию рекуперативного торможения используют для заряда аккумулятора, тем самым увеличивая ресурс движения.

Помимо электромобилей, также в других отраслях применяются взаимосвязанные многодвигательные комплексы, где периодически или постоянно электродвигатели могут находиться в генераторном режиме: производственные поточные линии, эскалаторы, лифты и другие подъёмно-спусковые механизмы.

Зачастую схемы питания таких многодвигательных комплексов реализуют от индивидуальных преобразователей частоты. На рис. 1 изображена подобная схема питания приводов линии обрезинивания корда на производстве автомобильных шин.

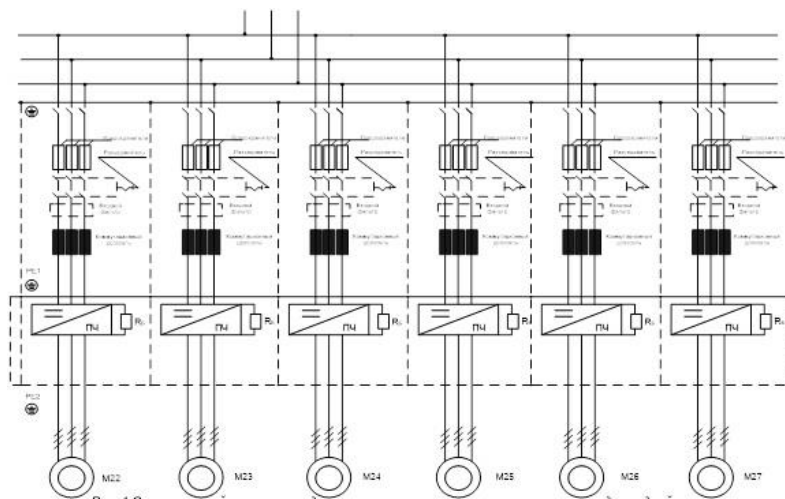


Рис. 1. Схема питания многодвигательной линии обрезинивания корда от индивидуальных преобразователей частоты

Такая схема надёжна, так как каждый двигатель запитан отдельно и, в случае выхода из строя одного преобразователя частоты, остальные продолжают работать. При этом в указанной схеме также присутствуют недостатки: при использовании такой схемы увеличивается количество оборудования, габариты и масса преобразователей частоты за счёт использования тормозных резисторов, также не используется энергия рекуперации, которая способствует повышению энергоэффективности. В таких преобразователях энергия рекуперации рассеивается в виде тепла на тормозных резисторах.

Есть несколько вариантов использования данной энергии рекуперации в многодвигательных системах. Один из вариантов представлен на рис. 2. Эта схема питания представлена в патенте на полезную модель заявка № 2022122425, от 18.08.2022 автора Онищенко Георгия Борисовича «Устройство питания приводов парных эскалаторов встречного движения» [0].

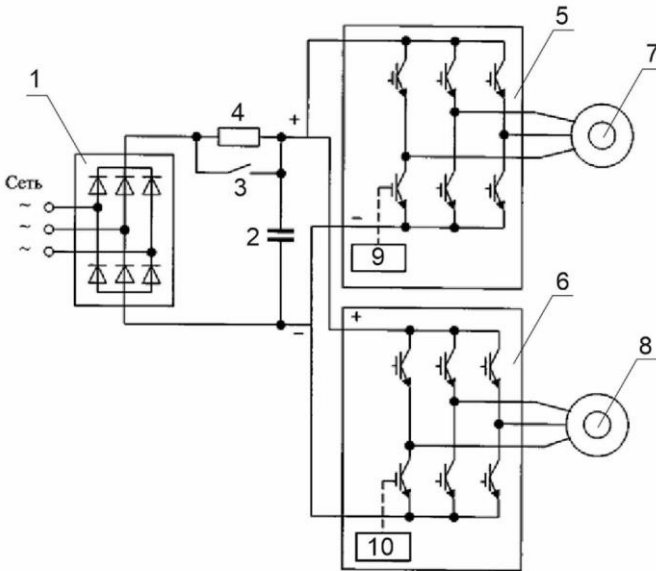


Рис. 2. Устройство питания приводов парных эскалаторов встречного движения

Электропривод эскалатора, который движется вниз, работает в генераторном режиме. В данной схеме предлагается использовать его энергию рекуперации для питания второго привода, который движется вверх. Если энергии рекуперации будет больше, чем необходимо второму приводу, его излишки будут рассеиваться в виде тепла на тормозном резисторе. В данном случае энергия рекуперации в сеть не будет передаваться.

Если будем рассматривать более сложные многодвигательные системы, то можно вместо индивидуальных преобразователей частоты использовать единый для всех приводов первичный источник питания в виде совмещённого блока выпрямления/инвертирования, подключенного входом к зажимам понижающего сетевого трансформатора (6/0,4кВ), а выходом – к общим для всех автономных инверторов шинам постоянного тока; в случае перехода одного или нескольких двигателей в генераторный режим, энергия рекуперации используется для питания соседних двигателей, в случае общего тормозного режима энер-

гия рекуперации передается в питающую сеть, где в свою очередь, может быть использована для питания других приемников, связанных одним технологическим режимом.

На рис. 3 изображена подобная схема питания, которая была запатентована Шатуновым С.Н. в соавторстве с к.т.н., доцентом Ганиевым Р.Н. в качестве полезной модели № 199635 «Система управления многодвигательными приводами производственных поточных линий» [0].

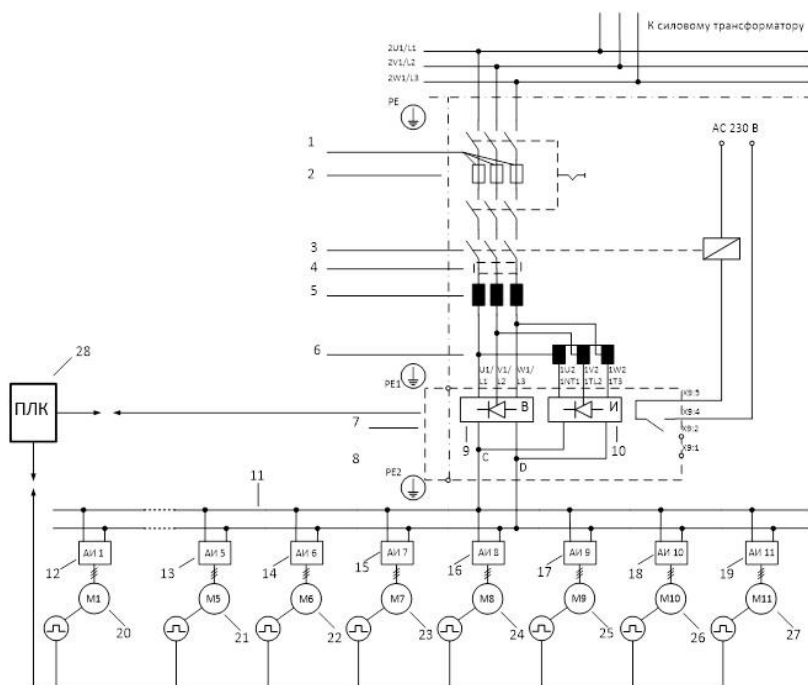


Рис. 3. Система управления многодвигательными приводами производственных поточных линий

Принцип работы предлагаемой модели: напряжение подается на блок выпрямления/инвертирования 8 через предохранители 1, разъединитель 2, основной контактор 3 и автотрансформатор 6. Входной фильтр 4 и коммутационный дроссель 5 служат для уменьшения высших гармоник потребляемого тока и защиты от аварийных токов короткого замыкания. В режиме

разгона и в установившемся режиме работы, через выпрямитель 9 подается выпрямленное напряжение к автономным инверторам 12-19 через шины постоянного тока 11. Автономные инверторы 12-19 задают частоту вращения электродвигателям 20-27. В случае если один или несколько из электродвигателей переходят в генераторный режим работы, энергия рекуперации будет направляться в шины постоянного тока 11, откуда будет использоваться для питания соседних электродвигателей, тем самым уменьшая потребляемую электроэнергию из сети и повышая энергоэффективность. В режиме торможения и замедления скорости поточной линии все электроприводы переходят в генераторный режим.

В этом случае, энергия рекуперации электродвигателей через шины постоянного тока 11 будет передаваться в блок инвертирования 10, откуда будет возвращаться в питающую сеть, где может быть использована для питания других потребителей электрической энергии, тем самым повышая энергоэффективность. Синхронизация приводов производится за счёт программируемого логического контроллера 28.

Предлагается использовать энергию от генераторных режимов асинхронных двигателей в составе частотно-регулируемых электроприводов для питания соседних двигателей. В случае перехода на генераторный режим большего количества двигателей в режимах торможения, вырабатываемую энергию предлагается выделять в питающую сеть за счёт использования активного выпрямителя. Таким образом, вся энергия, получаемая во время генераторных режимов работы взаимосвязанных асинхронных приводов, будет использоваться для питания других приёмников, а не рассеиваться в виде тепла на тормозных резисторах.

Выводы

Техническая реализация предлагаемой модели позволит снизить потребление электрической энергии, тем самым снизить затраты на оплату электроэнергии. Патент на полезную модель был оформлен в качестве реализации питания для линии обрешивания корда на производстве автомобильных шин.

Было рассчитано, что в случае реализации данной схемы на линии обрезаживания корда в производстве ПАО «Нижекам-скшина» потребляемая энергия из сети снижается на $5652,14 \text{ Вт/ч}$ и будет составлять $26386,54 \text{ Вт/ч}$. Согласно исследова-тельским данным, электропривод натяжного валика линии обре-зирования корда работает в режиме рекуперации до 20 часов в сутки, и того за год 7300 часов . Тариф принимали равным $2,8 \text{ руб. за } 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

В результате проведённого сравнительного анализа техни-ко-экономического расчёта было установлено, что внедрение экспериментальной схемы питания электропривода натяжного валика позволяет экономить $115529,8 \text{ рублей}$ в год с окупаемо-стью в 1 год по расчётным данным на 2019 год.

Рассмотренную схему можно также применять для питания других автоматизированных электротехнических комплексов (системы подъёма/спуска, другие производственные линии).

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство питания приводов парных эскалаторов встречного движения: патент на полезную модель, заявка № 2022122425, зарег. 18.08.2022 г., автор – Онищенко Г.Б.

2. Система управления многодвигательными приводами произ-водственных поточных линий: патент на полезную модель № 199635, зарег. 20.09.2020 г., авторы – Шатунов С.Н., Ганиев Р.Н.

Авторы:

Шатунов Степан Николаевич, аспирант Казанского нацио-нального исследовательского технологического университета. Окон-чил магистратуру факультета информационных технологий Ниже-камского химико-технологического института в 2019 году. E-mail: stepan_9009@mail.ru.

Тумаева Елена Викторовна, кандидат технических наук, до-цент, заместитель директора по научной работе Нижекамского химико-технологического института. В 1999 году окончила Казан-ский государственный технологический университет по специаль-ности «Электропривод и автоматика промышленных установок и тех-нологических комплексов». В 2006 году защитила диссертацию «Син-хронный электропривод с оптимальными режимами работы» на со-искание ученой степени кандидата технических наук. E-mail: e.tumaeva@mail.ru.

ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ С ОПТИМАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Кузин С.С., Тумаева Е.В., НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
г. Нижнекамск, Россия

***Аннотация.** Предложен способ повышения эффективности электропотребления автоматизированного электротехнического комплекса типовых производственных механизмов на базе асинхронных двигателей путем оптимального распределения мощности компенсирующих устройств. Предложена методика выбора экономически обоснованного коэффициента мощности автоматизированного электротехнического комплекса. Проведен сравнительный анализ сроков окупаемости компенсирующих устройств, работающих в режиме оптимального управления и в режиме поддержания одного и того же коэффициента мощности на каждом двигателе комплекса.*

***Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, асинхронный двигатель, компенсирующее устройство, оптимальное распределение мощности, экономически обоснованный коэффициент мощности, снижение потерь в кабельных линиях.*

В случае если на промышленных предприятиях применяется индивидуальная компенсация реактивной мощности (КРМ) по отношению к группе асинхронных двигателей, то как правило мощность индивидуальных компенсирующих устройств (КУ) рассчитывается по формуле (1):

$$Q_{\text{КУ}i} = P_{\text{ФАКТ}} \cdot (\text{tg} \varphi_{\text{ФАКТ}} - \text{tg} \varphi_{\text{ТРЕБ}}). \quad (1)$$

Однако такой подход не является оптимальным в отношении снижения потерь в питающих кабельных линиях (КЛ) при распределении мощности (КУ).

Изучая вопрос оптимального распределения мощности КУ, возникает вопрос ее ограничения в таких границах, в которых не возникает явление перекомпенсации. Также необходимо задать нижнюю границу коэффициента мощности электротехнического комплекса. Согласно [1] для сети 0,4 кВ минимальный $\cos \varphi \geq 0,95$. С этого коэффициента мощности следует начать по-

иск экономически обоснованного $\cos \varphi$ в отношении срока окупаемости конденсаторных установок, входящих в автоматизированный электротехнический комплекс типовых производственных механизмов (АЭТК ТПМ) на базе асинхронных двигателей (АД). Поддержание экономически обоснованного $\cos \varphi$ позволит минимизировать потери в питающих КЛ 0,4 кВ. Задача минимизации электрических потерь в питающих КЛ 0,4 кВ путем оптимального распределения мощности КУ относится к задаче условной оптимизации и может быть решена методом множителей Лагранжа [2].

Для решения такой задачи необходимо разработать математическую модель, включающую целевую функцию, подлежащую оптимизации:

$$\Delta P = R_1 \cdot \frac{(Q_1 - Q_{ky1})^2}{U^2} + \dots + R_i \cdot \frac{(Q_i - Q_{kyi})^2}{U^2} + \dots$$

$$\dots + R_n \cdot \frac{(Q_n - Q_{kyn})^2}{U^2}. \quad (2)$$

Минимум целевой функции ищется при ограничении:

$$Q_{k1} + \dots + Q_{ki} + \dots + Q_{kn} =$$

$$= \sum Q_{ky} \Rightarrow Q_{k1} + \dots + Q_{ki} + \dots + Q_{kn} - \sum Q_{ky} = 0, \quad (3)$$

где сумма Q_{ky} определяется исходя из экономически обоснованного $\cos \varphi$.

Граничные условия:

$$Q_{kyoi} \leq Q_i; \quad Q_{kyi} \geq 0. \quad (4)$$

Функция Лагранжа:

$$L = R_1 \cdot \frac{(Q_1 - Q_{ky1})^2}{U^2} + \dots + R_i \cdot \frac{(Q_i - Q_{kyi})^2}{U^2} + \dots$$

$$\dots + R_n \cdot \frac{(Q_n - Q_{kyn})^2}{U^2} + \dots$$

$$\dots + \Lambda \cdot (Q_{ky1} + \dots + Q_{kyi} + \dots + Q_{kyn} - \sum Q_{ky}). \quad (5)$$

Для отыскания минимума функции Лагранжа (5) вычисляются ее частные производные и приравниваются к нулю:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{2R_{\Phi 1}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_1 + \frac{2R_{\Phi 1}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_{\text{КУ}1} + l = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & -\frac{2R_{\Phi i}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_i + \frac{2R_{\Phi i}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_{\text{КУ}i} + l = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & -\frac{2R_{\Phi n}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_n + \frac{2R_{\Phi n}}{U_{\text{Л.НОМ}}^2} \cdot Q_{\text{КУ}n} + l = 0 \\
 & \sum Q_{\text{КУ}} - Q_{\text{КУ}1} - \dots - Q_{\text{КУ}i} - \dots - Q_{\text{КУ}n} = 0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Полученная система уравнений (6) может быть решена различными методами, например, Крамера или Гаусса [3, 4]. Решение (6) позволяет определить мощности КУ, необходимые для оптимального распределения мощности КУ в рассматриваемом АЭТК ТПМ. После чего потери активной мощности в питающих КЛ от протекания токов нагрузки при заданном экономически обоснованном $\cos \varphi$ будут минимальными [5].

Сравним эффективность двух подходов на примере пятидвигательного АЭТК с следующими необходимыми для расчетов характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики

Тип АД	P_{Φ} , кВт	Q_{Φ} , кВар	K_3 , о.е.	$\text{tg}\varphi_{\Phi}$, о.е.	$R_{\text{л}}$, Ом	$U_{\text{с}}$, кВ
4А200М4	31,53	21,58	0,78	0,68	0,39	0,4
4А200Л4	41,17	27,20	0,84	0,66	0,305	0,4
4А225М4	47,07	30,41	0,80	0,65	0,276	0,4
4А200Л4	37,17	25,80	0,76	0,69	0,309	0,4
АО 93-4	57,58	33,79	0,72	0,59	0,071	0,4

где P_{Φ} – фактического потребление активной мощности АД, кВт; Q_{Φ} – фактического потребление реактивной мощности, кВар; K_3 – коэффициент загрузки машин;; $R_{\text{л}}$ – активное эквивалентное сопротивление питающих кабельных линий, Ом; $U_{\text{с}}$ – линейное напряжение сети, кВ.

Сравнение проводится на основании определения экономически обоснованного $\cos \varphi$ в отношении срока окупаемости. Для чего произведем расчет индивидуальной КРМ для АД табл. 1, постепенно понижая $\text{tg} \varphi$ от 0,3 до 0.

Фиксации подлежат следующие результаты расчетов: мощность КУ $Q_{КУ}$, кВт; цена оборудования $C_{Об}$, тыс. руб.; Стоимость ежегодных амортизационных и эксплуатационных отчислений $C_{А.Э.}$, тыс. руб.; Потери активной мощности с индивидуальной КРМ ΔP_1 , Вт; Потери активной мощности без КРМ ΔP_2 , Вт; Стоимость потерь активной мощности с индивидуальной КРМ C_1 , тыс. руб.; Стоимость потерь активной мощности без КРМ C_2 , тыс. руб.; Экономия от снижения потерь активной мощности при КРМ $C_2 - C_1$, тыс. руб.

При этом: цена электроэнергии $C_{1кВт} = 4,2$ руб./кВт·ч, с НДС (20 %); амортизационные и эксплуатационные отчисления составляют 9 % от стоимости оборудования; режим работы комплекса круглогодичный, круглосуточный $T = 8760$ ч.; потери активной мощности в КУ $\Delta P_{КУ1кВар} = 5$ Вт на 1 кВт.

Для определения мощности КУ, необходимой для поддержания нужного $\cos \varphi$, воспользуемся формулой (1). Чтобы определить мощности КУ, необходимые для поддержания нужного $\cos \varphi$ при энергосберегающем подходе подставим в (6) значения, указанные в табл. 1. Полученные значения реактивной мощности КУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность индивидуальных КУ,
необходимых для поддержания $\text{tg}\varphi_{\text{ТРЕБ}}$, кВт

№	Q_{Φ}	1	2	1	2	1	2	1	2	$\text{tg}\varphi=0$
		$\text{tg}\varphi = 0,3$	$\text{tg}\varphi = 0,25$	$\text{tg}\varphi = 0,2$	$\text{tg}\varphi = 0,1$					
1	21	12	15	14	16	15	17	18	19	21
2	27	15	19	17	21	19	21	23	24	27
3	30	16	22	19	23	21	24	25	27	30
4	26	15	18	16	19	18	20	22	23	25
5	34	16	0	19	6	22	11	28	22	33
Итого	114	74	74	85	85	96	96	117	117	139

где 1 – традиционный подход; 2 – энергосберегающий подход.

Потери мощности в питающих КЛЮ,4кВ при индивидуальной КРМ определим по формуле:

$$\sum P = \Delta P_{КУ} + \Delta P_{Л},$$

где $\Delta P_{КУ}$ – затраты активной мощности КУ на генерацию, Вт:

$$\Delta P_{КУ} = Q_{КУ(\text{tg}\varphi = i)} \cdot \Delta P_{КУ1кВар}.$$

Секция 5

$\Delta P_{л}$ – потери мощности в питающих КЛЮ, 4кВ, Вт:

$$\Delta P_{л} = 3 \cdot \left(\frac{\sqrt{P_{\text{факт}}^2 + (Q_{\text{факт}} - Q_{\text{КУ}})^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сети}}} \right)^2 \cdot R_{л}.$$

Годовая стоимость потерь, рассчитывается по формуле, т. р:

$$C = \sum P \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot C_{\text{кВт}} \cdot 10^{-3}.$$

Результаты расчетов для $\text{tg}\varphi = 0,3; 0,25; 0,2; 0,1; 0$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технико-экономические показатели индивидуальной КРМ
при различном $\text{tg}\varphi$

Результат	$\text{tg}\varphi = 0,3$		$\text{tg}\varphi = 0,25$		$\text{tg}\varphi = 0,2$	
	1	2	1	2	1	2
$Q_{\text{КУ}}$, кВар	74,42	74,42	85,14	85,14	95,87	95,87
$C_{\text{Об}}$, т. р.	251,5	227,3	270,1	272,5	286,5	278,5
$C_{\text{А.Э.}}$, т. р.	22,6	20,46	24,3	24,53	25,79	25,07
ΔP_1 , Вт	16813	16526	16449	16250	16161	16032
ΔP_2 , Вт	21673	21673	21673	21673	21673	21673
C_1 , т. р.	618,6	608,0	605,2	597,9	594,6	589,8
C_2 , т. р.	797,4	797,4	797,4	797,4	797,4	797,4
$C_2 - C_1$, т. р.	178,8	189,4	192,2	199,5	202,8	207,6

Продолжение таблицы 3

Технико-экономические показатели индивидуальной КРМ
при различном $\text{tg}\varphi$

Результат	$\text{tg}\varphi = 0,1$		$\text{tg}\varphi = 0$
	1	2	
$Q_{\text{КУ}}$, кВар	117,33	117,33	138,78
$C_{\text{Об}}$, т. р.	304,27	302,51	322,59
$C_{\text{А.Э.}}$, т. р.	27,38	27,23	29,03
ΔP_1 , Вт	15810	15798,5	15762,8
ΔP_2 , Вт	21673	21673,3	21673,3
C_1 , т. р.	581,7	581,3	579,9
C_2 , т. р.	797,4	797,4	797,4
$C_2 - C_1$, т. р.	215,7	216,1	217,5

С помощью табл. 3 определим экономически обоснованный $\cos \varphi$ относительно срока окупаемости для двух подходов, табл. 4.

Окупаемость капиталовложений в зависимости от $\cos \varphi$
Энергосберегающий подход

Кол-во месяцев	Окупаемость КУ с учетом потерь ЭЭ в самих БК, амортизационных, эксплуатационных отчислений, тыс. руб.				
	$\operatorname{tg}\varphi=0,3$ ($\cos\varphi = 0,96$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,25$ ($\cos\varphi = 0,97$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,2$ ($\cos\varphi = 0,98$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,1$ ($\cos\varphi = 0,995$)	$\operatorname{tg}\varphi=0$ ($\cos\varphi = 1$)
15	-47,3	-88,9	-86,5	-104,3	-126,9
16	-31,5	-72,2	-69,2	-86,8	-108,8
17	-15,7	-55,6	-51,9	-68,5	-90,7
18	0,1	-39,0	-34,6	-50,8	-72,5
19	15,8	-22,4	-17,3	-32,8	-54,4
20	31,6	-5,7	0,01	-14,8	-36,3
21	47,4	10,9	17,3	3,2	-18,2
22	63,2	27,5	34,6	21,2	-0,03
23	79,0	44,1	51,9	39,2	18,1
24	74,3	36,2	44,1	30,0	7,2
25	90,1	52,9	61,4	48,0	25,3
Сумма единовременных вложений, т.р.	227,34	272,55	278,55	302,51	322,59

Традиционный подход

Кол-во месяцев	Окупаемость КУ с учетом потерь ЭЭ в самих БК, амортизационных, эксплуатационных отчисления, тыс. руб.				
	$\operatorname{tg}\varphi=0,3$ ($\cos\varphi = 0,96$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,25$ ($\cos\varphi = 0,97$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,2$ ($\cos\varphi = 0,98$)	$\operatorname{tg}\varphi=0,1$ ($\cos\varphi = 0,995$)	$\operatorname{tg}\varphi=0$ ($\cos\varphi = 1$)
15	-88,2	-94,4	-101,5	-107,4	-126,9
16	-73,3	-78,4	-84,6	-89,4	-108,8
17	-53,4	-62,4	-67,7	-71,4	-90,7
18	-43,5	-46,4	-50,8	-53,5	-72,5
19	-28,6	-30,4	-33,9	-35,5	-54,4
20	-13,7	-14,3	-17,0	-17,5	-36,3
21	1,2	1,7	-0,1	0,5	-18,2
22	16,1	17,7	16,8	18,4	-0,03
23	31,0	33,7	33,7	36,4	18,1
24	23,2	25,4	24,8	27,0	7,2
25	38,1	41,4	41,7	45,0	25,3
Сумма единовременных вложений, т.р.	251,55	270,05	286,55	304,27	322,59

Анализ табл. 4, позволяет определить экономически обоснованный $\cos \varphi$ с точки зрения снижения срока окупаемости конденсаторных установок АЭТК ТПМ.

Выводы

1. Полная КРМ не всегда целесообразна в отношении сроков окупаемости конденсаторных установок АЭТК ТПМ, всегда необходим технико-экономический расчет и определение экономически обоснованного $\cos \varphi$;

2. Применение теории оптимизации в определении оптимальной мощности КУ по критерию минимума потерь, позволяет минимизировать потери мощности от токов нагрузок при заданном экономически обоснованном $\cos \varphi$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015г. №380 «О порядке расчета значений соотношений потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии».

2. *Костин В.Н.* Оптимизационные задачи электроэнергетики / В.Н. Костин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 128 с.

3. *Тумаева Е.В.* Решение задачи оптимального распределения мощности индивидуальных компенсирующих устройств для группы асинхронных двигателей / Тумаева Е.В., Кузин С.С., Афлятунов И.Ф., Макусева Т.Г. // Вестник ПНИПУ Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №36. – С.175-192.

4. Tumaeva E.V. Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0.4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises / E.V. Tumaeva, S.S. Kuzin, E. N. Gavrilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Volume 643. – Number 1. – 012100.

5. Тумаева Е.В. Автоматизированный электротехнический комплекс группы асинхронных двигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств / Е.В. Тумаева, С.С. Кузин, И.Ф. Афлятунов // Материалы V Международной научно-технической конференции. Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. – Чебоксары. – 2021. – С.169–175.

Авторы:

Кузин Станислав Сергеевич, старший преподаватель кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий НХТИ ФГБОУ ВО

“КНИТУ”. В 2023 году окончил аспирантуру ФГБОУ ВО “КНИТУ” по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы». E-mail: stanislav_kuzin@mail.ru.

Тумаева Елена Викторовна, см. стр. 489.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ MATLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУСКОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Комилова М.Е., Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Республика Таджикистан

***Аннотация.** В данной статье для исследования пусковых переходных процессов электропривода насосной установки произведено компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink. В результате разработана компьютерная расчетная модель, которая имитирует работу электропривода насосной установки. С помощью данной модели можно анализировать пусковые переходные процессы асинхронного двигателя в составе электропривода с вентиляторным характером нагрузки.*

***Ключевые слова:** электропривод, асинхронный двигатель, переходные процессы, насосная установка, компьютерное моделирование.*

Больше века во всех секторах промышленности широко применяются электроприводы (ЭП) для различных механизмов и машин. Многочисленные достоинства ЭП позволили им стать доминирующим видом привода для промышленных механизмов. Известно, что в развитых странах доля потребления электроэнергии (ЭЭ) ЭП составляет более 60 % от вырабатываемого, что ещё раз показывает значимость данного типа привода. ЭП тесно связаны системой электроснабжения и часто взаимно влияют друг на друга. К примеру, низкое качество ЭЭ негативна, сказывается на работе асинхронных двигателей. Запуск высоковольтных двигателей большой мощности, как синхронные двигатели негативно влияет на сеть питания, создавая провалы напряжения [1]. В ЭП переход от одного рабочего режима к другому называется переходным режимом, которое обусловлено

сложными переходными процессами [2, 3]. Пусковой режим в электроприводах переменного тока сложно исследовать по физическим моделям, так как эти модели требуют в первую очередь финансовые затраты, а также имеют ограничения по количеству и содержанию экспериментов над моделью [4]. В компьютерном моделировании такие недостатки отсутствуют, кроме этого в современных специализированных программах для симуляции, предусмотрены широкий набор инструментов для проведения экспериментов.

Для исследования пусковых переходных процессов ЭП переменного тока выполним компьютерное моделирование с использованием программы MATLAB/Simulink [5]. На рис. 1 показана разработанная компьютерная модель для исследования пусковых переходных процессов ЭП с асинхронным двигателем мощностью 200 кВт.

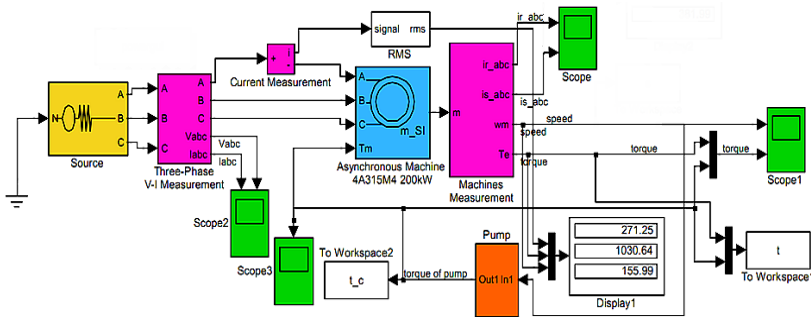


Рис. 1. Компьютерная модель для исследования пусковых переходных процессов ЭП насосной установки

Модель (рис. 1) разработана в системе MATLAB с использованием библиотеки Power-System, которая служит для разработки моделей устройств или систем для энергетических и электротехнических направлений [6]. Исследуемый ЭП имеет электродвигатель мощностью 200 кВт, ток статора 382 А и синхронная частота вращения 1500 об/мин. Рабочей машиной для ЭП служит насосная установка соответствующая параметрам электродвигателя серии 4A315M4. Для оценки работы двигателя и насосной установки можно воспользоваться их механическими характеристиками. Механические характеристики насоса и

Секция 5

асинхронного двигателя используемые в модели (рис. 1) приведены на рис. 2 и 3.

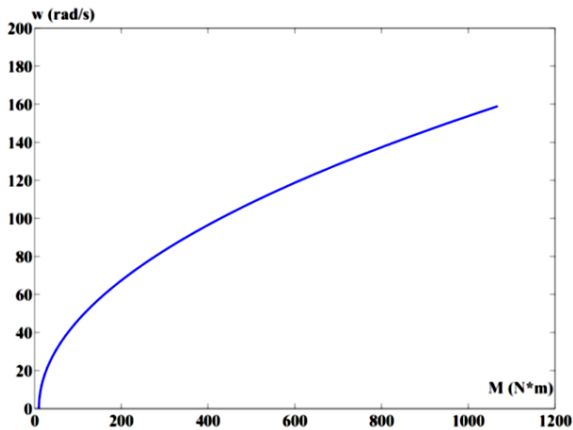


Рис. 2. Характеристика насосной установки

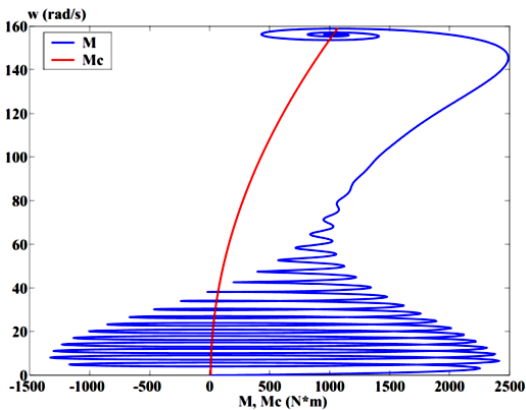


Рис. 3. Механическая характеристика асинхронной машины

Характеристика насоса (рис. 2) показывает, что насос имеет вентиляторный характер нагрузки. Такой вид нагрузки является весьма сложной, так как по мере увеличения скорости насоса, его статический момент увеличивается по квадратичной зависимости.

Результаты моделирования показаны на рис. 4-6.

Секция 5

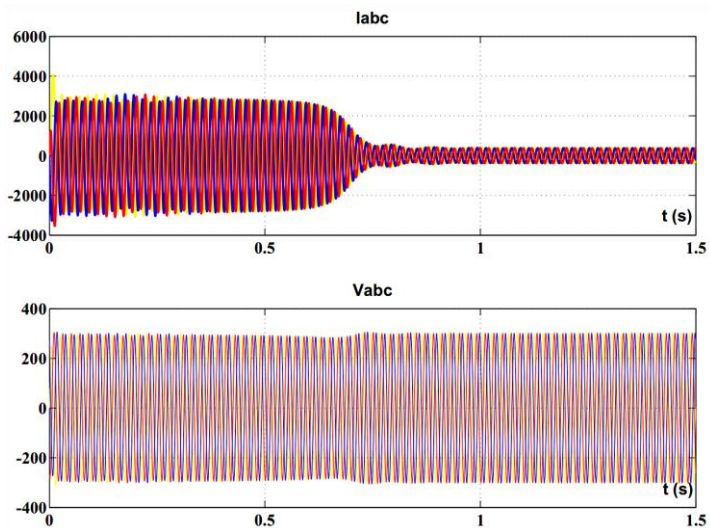


Рис. 4. Графики изменения токов и напряжения источника питания при пуске асинхронного двигателя

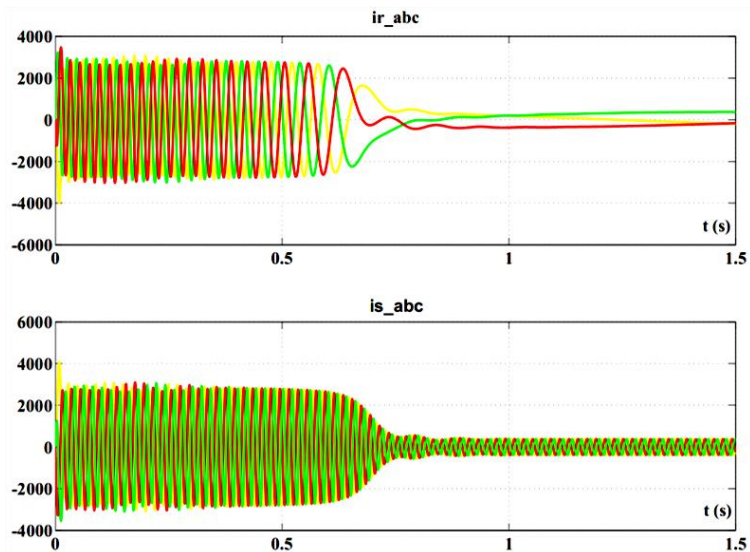


Рис. 5. Графики изменения токов и напряжения двигателя при пуске

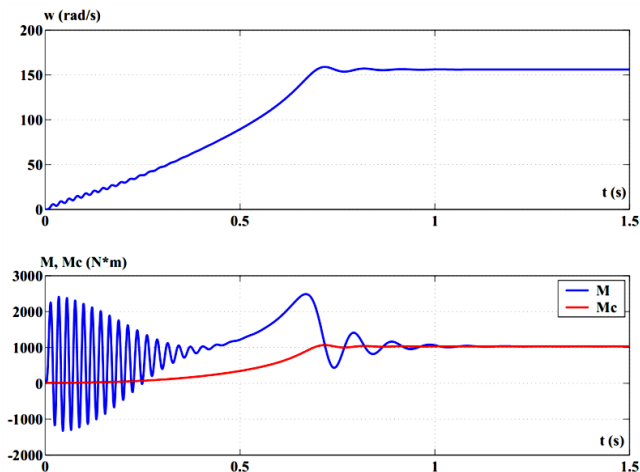


Рис. 6. Графики изменения параметров электропривода: угловой скорости, электромагнитный момент, момент нагрузки

По рис. 6 видно, что при пуске электромагнитный момент АД изменяется знакопеременно, а статический момент создаваемой насосом изменяется по нарастающей и без скачков.

Выводы

Разработанная модель (рис. 1) позволяет более обширно исследовать переходные процессы электропривода насосной установкой. Кроме этого разработанную модель после корректировок можно использовать для исследования других вопросов, как исследования потери мощности в двигателе, нагрева обмоток двигателя, оценка надежности электропривода, нагревы в обмотках и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вохидов, А.Д. К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема / А.Д. Вохидов, Ш.Т. Дадабаев, Ф.М. Разоков // Надежность. – 2016. – Т. 16, № 4(59). – С. 36–39. – EDN YUINKZ.
2. Дадабаев, Ш. Т. Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 179–184. – EDN EDWXTL.

3. Ларионов, В.Н. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой : учебное пособие / В.Н. Ларионов, А.Г. Калинин. – Чебоксары : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2012. – 146 с.

4. Алиев Д.С., Джураев Д.С. Применение энергоэффективных машин переменного тока. В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы I Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 16–17 ноября 2017 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2017. – С. 11–15.

5. Дадабаев, Ш. Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска / Ш. Т. Дадабаев // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 76–80. – EDN YOWNQF.

6. Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate / E. Gracheva, M. Toshkhodzhaeva, O. Rahimov [et al.] // International Journal of Technology. – 2020. – Vol. 11, No. 8. – P. 1557-1569. – DOI 10.14716/ijtech.v11i8.4549. – EDN LOPBMU.

Автор

Комилова Махбуба Едгоровна, старший преподаватель, Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Республика Таджикистан. E-mail: komilova.makhbuba@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧУВАШСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Кравченко Г.А., Матюнин А.Н., Васильева Л.А., Андреев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные исследования, ведущиеся в Чувашском государственном университете в области электроразрядных процессов в воздухе при атмосферном давлении. Основоположителем данного направления является недавно ушедший из жизни Юрий Петрович Пичугин – кандидат технических наук, доцент кафедры

электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств.

Ключевые слова: газоразрядная ячейка, электрический разряд, диэлектрический барьерный разряд, безбарьерный разряд.

В Чувашском государственном университете активно ведутся исследования электроразрядных процессов в воздухе при атмосферном давлении как в безбарьерных разрядных ячейках, так и в ячейках диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Их цель – увеличение эффективности плазменных и плазмохимических технологий, достижение большей производительности и повышение срока службы разрядных ячеек различного назначения, включая плазмохимические генераторы озона.

Вопросы математического моделирования электроразрядных процессов в барьерных и безбарьерных ячейках рассмотрены в работах [1–7]. Разработано устройство для визуального наблюдения пространственно-временной структуры ДБР, позволяющее формировать длительную картину структуры разряда [8, 9]. Это имеет немаловажное значение при разработке математической модели.

Важной частью являются исследования, направленные на повышение ресурса разрядных ячеек, в частности, генераторов озона. Здесь можно выделить несколько путей, по которым ведутся исследования: поиск и разработка наиболее стойких к воздействию микроразрядных процессов материалов для диэлектрического барьера, использование оригинальных конструкций разрядных ячеек при проектировании озонаторных установок, например, ячейки ДБР с вращающимся диэлектрическим барьером [10, 11]. В работах [12–16] предложена и исследована система высоковольтных электродов с многослойным диэлектрическим барьером. Разработаны составы короностойких покрытий для защиты диэлектрических барьеров от воздействия микроразрядов и повышенной температуры. В состав таких покрытий входит кремнийорганический лак и порошок неорганического наполнителя. Некоторые вопросы, касающиеся воздействия микроразрядов на поверхностные плёнки и их разрушения, исследованы в работах [17–19]. Ряд исследований посвящён повышению энергоэффективности разрядных ячеек [20–

26]. Для повышения производительности генератора озона, работающего на ДБР, в работах [27, 28] предложено использовать высоковольтные электроды с большими активными электрическими сопротивлениями и представлены результаты экспериментальных исследований генерации озона в барьерном разряде с применением таких электродов в озонаторах различного типа. Пичугин Ю.П. является соавтором патента на генератор озона с взрывающимися электродами [29]. В его основе лежит явление самовосстановления электрической прочности конструкции при пробое благодаря тонким металлизированным электродам. Это явление, например, широко используется в металлобумажных и металлоплёночных конденсаторах.

В работе [30] представлен генератор высоковольтных наносекундных импульсов, работа которого основана на применении ячейки ДБР с вращающимся диэлектрическим барьером. Данное устройство было запатентовано [31]. Ещё одним важным направлением исследований является исследование и разработка безбарьерных разрядных ячеек для синтеза озона [32]. Такие исследования востребованы в силу того, что в ячейках ДБР, используемых в качестве плазмохимических генераторов озона, наиболее уязвимой частью является диэлектрик. Факторами, приводящими к быстрому его разрушению, являются воздействие на него микроударов, а также реакция озона, обладающего крайне высокой реакционной способностью, с поверхностью диэлектрика.

Выводы

Таким образом, научным коллективом по широкому перечню направлений ведутся исследования электроразрядных процессов в воздухе при атмосферном давлении. Многие годы координировал исследования по этим направлениям Ю.П. Пичугин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюнин А.Н., Нестерин В.А., Пичугин Ю.П. Применение упрощенной математической модели при исследовании барьерного разряда // Вестник Чувашского университета. 2017. №1. С. 130–136.
2. Андреев В.В., Васильева Л.А., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением // Прикладная физика. 2011. №1. С. 52–57.

3. *Пичугин Ю.П., Кравченко Г.А.* Оценка геометрических и температурных параметров микроразрядов в барьерном разряде // Вестник Чувашского университета. 2011. №3. С. 102–107.

4. *Пичугин Ю.П., Слонимский С.Д., Ильин В.В.* Математическое моделирование микроразрядных процессов в барьерных озонаторах // В сборнике: Научные и производственно-технические проблемы энергетики и электротехники. Сборник научных трудов. Чебоксары, 2005. С. 163–167.

5. *Нестерин В.А., Пичугин Ю.П., Матюнин А.Н.* Применение упрощенной математической модели при исследовании барьерного разряда // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. №7. С. 57–62.

6. *Нестерин В.А., Пичугин Ю.П., Матюнин А.Н.* Применение упрощенной математической модели при исследовании барьерного разряда // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. №8. С. 47–52.

7. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Шамсутдинов Р.Ф.* Моделирование барьерного разряда // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2004. Т. 47, №4. С. 132–136.

8. *Пичугин Ю.П.* Электрогазодинамическое устройство: патент Рос. Федерация МПК С01В13/00/; заявитель и патентообладатель Пичугин Юрий Петрович. №2200126 заявлен 07.12.2001; опубликован 10.03.2003, бюл №7.

9. *Андреев В.В., Васильева Л.А., Кравченко Г.А., Пичугин Ю.П., Филиппов В.Г.* Результаты исследования структуры барьерного разряда // Нелинейный мир. 2009. Т. 7, №11. С. 811–819.

10. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.* Исследование электрических разрядов в воздухе между подвижными электродами // Физика плазмы. 2011. Т.37, №12. С. 1130–1135.

11. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П.* Исследование низкотемпературной плазмы между вращающимися электродами // Физика плазмы. 2014. Т.40, №6. С. 563–570.

12. *Андреев В.В., Кравченко Г.А., Пичугин Ю.П.* Исследование короностойких покрытий в плазмохимических генераторах озона // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сборник научных трудов. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 388 с. С. 45–46.

12. *Andreev V.V., Kravchenko G.A., Pichugin Yu.P.* Investigation of corona-resistant coatings for the dielectric surface in a plasma-chemical ozone generator on the base of dielectric barrier discharge // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 862. 062086.

14. *Кравченко Г.А., Макаров А.М., Пичугин Ю.П.* Оценка ресурса системы высоковольтных электродов генератора озона с многослой-

ным диэлектрическим барьером // Вестник Чувашского университета. 2013. №3. С. 193–196.

15. *Мионов Д.И., Кравченко Г.А., Макаров А.М., Пичугин Ю.П., Слонимский С.Д.* Статистическая обработка результатов экспериментов для оценки влияния конструктивных элементов разрядной камеры на ресурс генератора озона // Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов. Чебоксары, 2017. С. 46–50.

16. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П.* Воздействие диэлектрического барьерного разряда на поверхностную пленку на текстолите // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014: в 2 т. Т. 2; – Казань: Изд-во КНИТУ, 2014.– 414 с. С. 10–11.

17. *Андреев В.В.* Исследование воздействия диэлектрического барьерного разряда на кремнийсодержащую плёнку // Прикладная физика. 2014. №6. С.24–28.

18. *Андреев В.В., Васильева Л.А.* Воздействие коронного разряда на нанесённые на поверхность текстолита плёнки термостойких кремнийорганических лаков с добавками порошков Al_2O_3 и TiO_2 // Прикладная физика. 2016, №4. С. 16–21.

19. *Andreev V.V.* Investigating interaction of microdischarges with TiO_2 surface films in the cell of dielectric barrier discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1348. 012001.

20. *Андреев В.В., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.* Исследование эффективности плазмохимических генераторов озона на барьерном разряде в воздухе при атмосферном давлении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2011. №4. С. 112–117.

21. *Андреев В.В., Васильева Л.А., Пичугин Ю.П.* Исследование энергетической цены синтеза озона в ячейках поверхностного диэлектрического барьерного разряда // Прикладная физика. 2014. №3. С.43–46.

22. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.* Комбинированный барьерный разряд в воздухе при атмосферном давлении // Прикладная физика. 2011. №6. С. 74–78.

23. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.* Влияние фазового сдвига между напряжениями в контурах разряда на комбинированный барьерный разряд при атмосферном давлении в воздухе // Прикладная физика. 2013. №4. С. 27–32.

24. *Андреев В.В., Васильева Л.А.* Исследование поверхностного барьерного разряда, создаваемого электродами в виде ряда параллельных полос // Прикладная физика. 2012. №6. С. 116–122.

25. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П.* Влияние полярности напряжения на синтез озона в диэлектрическом барьерном разряде // Прикладная физика. 2017. №3. С. 47–51.

26. *Andreev V.V., Vasilyeva L.A., Pichugin Yu.P.* High voltage waveform influence on ozonizer productivity on dielectric barrier discharge basis // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1047. 012198.

27. *Андреев В.В., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П.* Плазмохимический генератор озона с повышенной однородностью микроразрядных процессов в барьерном разряде // Прикладная физика. 2014. №3. С.39–42.

28. *Andreev V.V., Kravchenko G.A., Matyunin A.N., Pichugin Yu.P.* Use electrodes with high active electrical resistance as a way to increase the productivity of an ozone generator based on dielectric barrier discharge // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 919. 062048.

29. *Слонимский С.Д., Пичугин Ю.П.* Система электродов генератора озона: патент Рос. Федерация МПК C01B13/11; заявитель и патентообладатель Пичугин Юрий Петрович.– № 2326811; заявлен 03.05.06; опубликован 20.06.08, бюл. №17.

30. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.* Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе барьерного разряда // Приборы и техника эксперимента. 2013. Т.56. №3. С. 58–60.

31. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин Г.Г., Телегин В.Г.* Патент на изобретение РФ №2488956. Генератор высоковольтных импульсов. Заявка №2012123540/08 от 06.06.2012. Опубликовано 27.07.2013. Бюл. № 21.

32. *Андреев В.В., Пичугин Ю.П.* Импульсная безбарьерная разрядная ячейка // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 134–137.

Авторы:

Кравченко Галина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончила факультет электронной техники ЛЭТИ им В.И. Ульянова (Ленина) в 1992 году. В 2012 году защитила диссертацию на тему «Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона». E-mail: krav68@bk.ru.

Матюнин Алексей Николаевич, см. стр. 506.

Васильева Людмила Анатольевна, старший преподаватель кафедры радиотехники и радиотехнических систем, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончила физико-технический факультет ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» в 2007 году. E-mail: ask_lyuda@mail.ru.

Андреев Всеволод Владимирович, см. стр. 187.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Лавриненко В.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Дан обзор современного состояния и тенденций развития тягового электропривода и его элементов: электродвигателей, инверторов, тяговых аккумуляторов. Приведены сведения о критериях выбора элементов электропривода и особенностях развития инфраструктуры зарядных станций.*

***Ключевые слова:** зарядная станция, электромобиль, тяговый привод, инвертор, транзистор, IGBT, MOSFET, двигатель IPMSRM.*

Введение

Попадание в окружающую среду вредных или избыточных количеств веществ, включая газы (такие как диоксид углерода CO_2 , монооксид углерода CO , диоксид серы SO_2 , оксид азота N_2O , метан CH_4 и хлорфторуглероды), частицы (как органические, так и неорганические) может вызвать заболевания, аллергию и даже смерть людей. Также это может нанести вред другим живым организмам, таким как животные и растения, может нанести ущерб естественной или искусственной экосистеме Земли. Загрязнение воздуха вызывают как природные процессы, так и человеческая деятельность.

Существует связь между смертностью от пневмонии и загрязнением воздуха от выбросов автотранспорта. Каждый год около 7 миллиона человек на Земле умирают из-за загрязнённого воздуха [1]. Важной причиной этих смертей являются диоксид азота NO_2 и другие оксиды азота (NO_x), выделяемые дорожными транспортными средствами.

Установлена связь между концентрацией углекислого газа CO_2 в атмосфере и средней приповерхностной температурой Земли: в течение среднего и позднего ледниковых периодов, предшествующих современному времени, концентрация атмосферного углекислого газа CO_2 снижалась во время длительных ледниковых периодов и резко повышалась во время коротких межледниковых периодов. В течение последних десятилетий наблюдается рост концентрации углекислого газа в атмосфере.

Международные соглашения по ограничению выбросов применяются к шести парниковым газам: углекислому газу CO_2 , метану CH_4 , оксиду азота N_2O , гидрофторуглеродам, перфторуглеродам и гексафториду серы SF_6 .

По данным Агентства по охране окружающей среды США, крупнейшим источником парниковых газов в стране является транспорт, на долю которого приходится 27 % всех выбросов парниковых газов в США [2]. Как следует из доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН (IPCC) в расчете на 100 лет парниковая активность метана в 28 раза сильнее, чем углекислого газа, а в 20-летней перспективе — в 84 раза. Основными антропогенными источниками метана являются животноводство, рисоводство, горение биомассы (в т. ч. сведение лесов), выбросы газа и летучие выбросы промышленности, занимающейся добычей ископаемого топлива. Сельскохозяйственные почвы выделяют оксид азота N_2O , частично из-за удобрений. Фторированные газы из хладагентов занимают большую часть в антропогенных выбросах.

Автомобильный транспорт, тепловые электростанции и промышленные предприятия являются в пределах городов главными источниками загрязнений воздуха. Большая часть углекислого газа образуется в результате сжигания ископаемого топлива: угля, нефти и природного газа. Выбросы, вызванные деятельностью человека, увеличили содержание углекислого газа в атмосфере примерно на 50 % по сравнению с доиндустриальным уровнем.

Население Земли превысило 8 млрд. человек. В 2035 г. прогнозируется увеличение количества людей до 9 млрд. человек. Количество автомобилей приближается к 1,7 млрд. шт, а количество тепловых электростанций превысило 29000 шт. Контролировать уровень выбросов 2 млрд. автомобилей не представляется возможным, но вполне реально наладить контроль за выбросами парниковых газов и вредных веществ на тепловых электростанциях. При нынешних объемах выбросов, составляющих в среднем шесть с половиной тонн на человека в год, до 2030 г. температура может повыситься по сравнению с доиндустриальным уровнем в среднем на $1,5^\circ\text{C}$, что является желательным пределом, установленным Парижским соглашением 2015 г. [3].

Электромобили вытесняют автомобили с двигателями внутреннего сгорания

Все ведущие производители автомобилей организовали серийное производство электромобилей и гибридных автомобилей, которые относятся к классу транспортных средств с новой энергией (англ. new energy vehicle - NEV). Электродвигатели обеспечивают высокий КПД (95 % в сравнении с 35 % для двигателей внутреннего сгорания). Одиннадцать из двадцати крупнейших производителей электромобилей в мире являются китайскими. В 2022 г. в мире произведено более 10 миллионов новых электромобилей или 14 % от всех проданных автомобилей. Хотя электромобили во время работы не загрязняют окружающую среду, для их производства, эксплуатации и утилизации требуется электроэнергия, выработка которой на электростанциях приводит к выбросам вредных веществ. Тем не менее, в период жизненного цикла электромобиля среднего класса выбрасывается на 50 % меньше парниковых газов в сравнении с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания. В настоящее время применение транспорта с новой энергией позволяет уменьшить потребление нефти в мире на 0,6 млн. баррелей в день. Прогнозируется сокращение мирового спроса на нефть, как минимум, на 5 млн. баррелей в день к 2030 г. в связи с переходом на электротягу. Доля производства новых электромобилей на мировом рынке в 2023 г. достигнет 18 %, а в Китае – 28 %, отмечается в обзоре, подготовленном Международным энергетическим агентством (МЭА). С января по август 2023 г. на долю Китая пришлось 61% мировых продаж транспортных средств NEV. В августе 2023 г. доля Китая выросла до 65 %.

К тяговому электроприводу предъявляются специальные требования, такие, как высокое быстродействие, широкий диапазон частот вращения, включая нулевую частоту вращения, низкие уровни пульсаций вращающего момента и чрезвычайно высокая удельная мощность [9]. Методы управления и модуляции могут напрямую влиять на удельную мощность и стоимость инвертора.

Быстрое снижение цен на тяговые аккумуляторы, стоимость которых составляет до 40 % стоимости электромобиля, привело к падению цен на электромобили в последнее время. Уменьше-

ние стоимости компонентов электромобилей, как ожидается, продолжится. К 2030 г стоимость электромобиля сравняется со стоимостью аналогичного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания. Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание электромобилей значительно ниже, чем на обслуживание автомобилей.

В базовой комплектации электромобилей Tesla Model 3 применяют литий-ионные тяговые аккумуляторы с более дешёвыми катодами из фосфата лития и железа (LFP) [3] и меньшей в 2,5 раза удельной энергоёмкостью 0,12 кВт·ч/кг в сравнении с аккумуляторами с катодами из никеля, кобальта, алюминия (NCA). Перспективными являются литий-воздушные батареи (Li-air), обладающие удельной энергоёмкостью 11,4 кВт·ч/кг, которая приближается к удельной энергоёмкости бензина 13 кВт·ч/кг. Ожидается, что в ближайшие 2 года появятся первые серийные автомобили с тяговыми аккумуляторами с твёрдотельным электролитом. В зависимости от типа электролита различают батареи: апротонные, водные, водно-апротонные и твердотельные.

Тенденция увеличения напряжения тяговых аккумуляторов обусловлена необходимостью увеличения удельной мощности электропривода [3]. Более высокое напряжение в звене постоянного тока сокращает время зарядки батареи, включая экстремально быструю зарядку (Extreme Fast Charging - XFC). Уменьшаются так же масса кабелей и потери в инверторе.

Применение более высокого напряжения постоянного тока предъявляет новые требования к электроприводу. Элементы инвертора должны быть изменены, чтобы выдерживать более высокие напряжения. Для мониторинга и защиты тяговой аккумуляторной батареи, а также для поддержания одинакового уровня заряда большого количества ячеек требуется применение более совершенной системы управления.

Модули с IGBT являются самыми популярными коммутационными устройствами в инверторах электромобилей из-за их цены и доступности [4]. Электромобили производства Tesla, Nissan, Chevrolet и Audi все еще используют тяговые батареи с напряжением 400 В. Например, в электромобиле Tesla Model S с напряжением тягового аккумулятора 400 В используется двух-

уровневый инвертор с 6 одиночными ультрабыстрыми транзисторами IGBT типа TO-247 6-го поколения с частотой коммутации до 30 кГц от компании International Rectifier. В электромобиле Tesla Model 3 применяются МОП-транзисторы (MOSFET) на основе карбида кремния (SiC) от STMicroelectronics с пользовательским пакетом. Porsche, Aston Martin и Fisker перешли на тяговые аккумуляторы с напряжением 800 В для своих новых продуктов [5]. Кроме того, Lucid Motors пошла дальше и объявила, что модель Air EV будет оснащена системой постоянного тока с напряжением свыше 900 В. С повышением уровня напряжения такие производители, как Eaton, Hitachi представили двухуровневые инверторы с полупроводниковыми приборами на более высокие напряжения 800 В [6].

IGBT-транзисторы на 1200 В и 1700 В и SiC транзисторы MOSFET уже используются в инверторах. Польская компания MEDCOM внедрила для электробусов инверторы с использованием SiC транзисторов MOSFET, что привело к снижению габаритов инвертора более чем на 30 % [7].

Другая важная проблема заключается в том, что инфраструктура зарядных станций для прямой зарядки электромобилей с напряжением 800 В сейчас недоступна во всем мире. В ближайшее время будут устанавливаться зарядные станции с поддержкой сверхбыстрой зарядки (XFC). Китайский энергетический совет разработал стандарт зарядки 1500 В, 600 А, 900 кВт [8]. Строительство зарядных станций происходит в соответствии с девизом «заряжайся там, где припарковался». К 2028 г. количество зарядных пунктов на всех континентах планируется увеличить с 15 до 55 млн. шт.

Главными критериями при выборе тяговых электродвигателей являются высокая удельная мощность, высокий КПД и низкая стоимость. Десять лет назад асинхронные двигатели были выдающимся выбором для большинства электрических транспортных средств. В настоящее время почти все производители электромобилей используют в своих конструкциях синхронные двигатели с постоянными магнитами. В электрических велосипедах, мотоциклах, внедорожниках предпочтительнее использовать вентильные двигатели постоянного тока. Hullikal, Tronx,

Spero, 22 Motors и NDS Eco Motors используют вентильные двигатели для своих продуктов.

Хотя многие большегрузные и железнодорожные транспортные средства все ещё используют асинхронные двигатели, проявляется растущий интерес в последние годы к синхронным двигателям с постоянными магнитами из-за их более высокой удельной мощности и КПД. В будущем прогнозируется нехватка постоянных магнитов для электромобилей.

В электромобилях Tesla Model 3, Volkswagen ID4 используются синхронные реактивные двигатели (SRM) с размещением постоянных магнитов внутри магнитопровода ротора (IPMSRM).

Заключение

Повышение эффективности преобразования информации и энергии является главной тенденцией развития тягового электропривода [9,10]. Все более популярным в тяговом электроприводе становится способ прямого управления моментом (DTC) синхронного двигателя с постоянными магнитами внутри магнитопровода (IPMSM), с трехуровневым инвертором. Традиционная схема прямого управления вращающим моментом с гистерезисным регулятором заменена схемой с ПИ-регулятором и двумя компараторами, что позволило инвертору работать с постоянной частотой коммутаций [11]. Значения пульсаций вращающего момента уменьшены более чем на 50 % для различных скоростей за счет увеличения стоимости вычислений примерно на 25 %. Разработаны схемы прямого управления моментом асинхронного двигателя с семиуровневым инвертором с каскадной мостовой схемой (Cascaded H-Bridge CHB) с одним источником в [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Всемирная организация здравоохранения. Выпуск новостей, Женева: ВОЗ, 25 марта 2014. Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/detail/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>.

2. S.Wappelhorst, D. Hall, M. Nicholas, and N. Lutsey. Analyzing policies to grow the electric vehicle market in European cities, Int. Council Clean Transp., Washington, DC, USA, Tech. Rep., Feb. 2020.

3. C. Jung. Power up with 800-V systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles, IEEE Electric Mag., vol. 5, no. 1, pp. 53-58, Mar. 2017.

4. J. Reimers, L. Dorn-Gomba, C. Mak, and A. Emadi. Automotive traction inverters: Current status and future trends. IEEE Trans. Veh. Technol. vol. 68, no. 4, Apr. 2019, pp. 3337-3350.

5. P. Harrop. (Jun. 2019). Electric Vehicles Go High Voltage. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-article/electricvehicles-go-high-voltage/17347>.

6. M. Kane. (Oct. 2019). Hitachi Starts Series Production of 800-Volt Inverters for EVs. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/377340/hitachi-production-800-v-inverters-evs/>.

7. Power Electronic Solutions for Public Transport; Trams, Trolleybuses, Metro, Ebuses. [Online]. Available: https://medcom.com.pl/uploads/downloads/medcom-trams-metro-ebuses-trolleybuses_1695992111.pdf.

8. J. Boyd. (Dec. 2018). China and Japan Push for a Global Charging Standard for EVs. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8635804>.

9. Лавриненко В.А. Тенденции и проблемы развития электромеханики / В. А. Лавриненко // Технические науки: сегодня и завтра : тез. докл. юбилейн. итоговой науч. конф. – Чебоксары, 1997. – С. 164–166.

10. Lavrinenko V.A. The tendencies of electromechanical systems development. Proc. the All-Russia electrotechnical congress WELC'99. Russia, June 29–July 3 1999, vol.1., pp. 155-157.

11. D. Mohan, X. Zhang, and G. H. Beng Foo. Generalized DTC strategy for multilevel inverter fed IPMSMs with constant inverter switching frequency and reduced torque ripples, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 32, no. 3, Sep. 2017, pp. 1031-1041.

12. F. Khoucha, K. Marouani, M. Benbouzid, A. Kheloui, and A. Mamoune. A 7-Level single DC source cascaded H-bridge multilevel inverter with a modified DTC scheme for induction motor-based electric vehicle propulsion, Int. J. Veh. Technol., vol. 2013, Feb. 2013, pp. 1-9.

Автор

Лавриненко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 1979 году, получил ученую степень в 1988 году, защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование многоскоростных асинхронных двигателей с экранированными полюсами». E-mail: Lv20101974@yandex.ru.

МАЛОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Сидоров С.Н., Старостина Я.К., Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Введение

Одно из решений, ведущих к минимизации числа полупроводниковых ключей в схемах регулируемого асинхронного электропривода состоит в применении так называемых *моновентильных* трёхфазных схем. Главным элементом *моновентиля* служит единственный транзисторный ключ, который может быть установлен в общей для всех трёх фаз цепи источника питания, импульсного регулятора или нагрузки. Например, в случае соединения фаз по схеме звезды местом нахождения данного регулирующего органа может служить нулевая точка статорных обмоток электродвигателя или установленного на сетевом входе вольтодобавочного трансформатора. Обращает внимание наличие нескольких положительных свойств моновентиля. Из схемы на рис. 1, а видна возможность импульсного регулирования 3-ёх фазного напряжения с помощью установленного на выходе вспомогательного диодного моста $V1, \dots, V6$ транзисторного ключа $V7$ без традиционно возникающих при $r2 > r1$ искажениях потребляемого тока. Для сравнения на рис.1,б показаны кривые 3-ёх фазного тока искажённой формы, протекающего на сетевом входе выпрямителя при соотношении активных сопротивлений анодных цепей и нагрузки моста $r1 < r2$. В схеме моновентиля установка транзисторного ключа на выходе диодного моста меняет соотношение указанных сопротивлений $r1 > r2$. Известно, что эквивалентное сопротивление транзистора в режиме насыщения достаточно мало, позволяя принять $r1 = 1 \text{ Ом}$; $r2 = 0,1 \text{ Ом}$. Из рис. 1 видно, что коммутации регулирующего транзистора в этом случае не ведут к каким-либо заметным искажениям потребляемого тока. Это свойство делает моновентиль достаточно привлекательным не только в целях упрощения регулятора, но и для достижения электромагнитной совместимости асинхронного привода с трёхфазной питающей сетью.

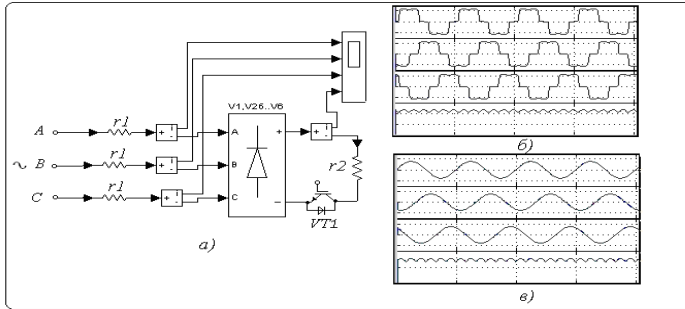


Рис. 1. Моноventильный ключ трёхфазного тока (а) при соотношениях активного сопротивления входных и выходных цепей диодного моста $r1 = 0,1 \text{ Ом}$, $r2 = 1 \text{ Ом}$ (б); $r1 = 1 \text{ Ом}$, $r2 = 0,1 \text{ Ом}$ (в)

Покажем, что моноventильные ключи могут служить средством унифицированного исполнения ряда асинхронных электроприводов с улучшенной электромагнитной совместимостью. Объединяющим элементом этих приводов является импульсный регулятор в виде транзисторно-трансформаторного модуля с полупроводниковыми ключами в первичных обмотках трёхфазного вольтодобавочного трансформатора, число которых обуславливает возможность работы в одном или нескольких квадрантах механических характеристик.

Одноквadrантный моноventильный электропривод с высокочастотным импульсным регулированием напряжения в статорных обмотках асинхронного двигателя

Простейшая схема асинхронного электропривода с моноventильным импульсным регулятором статорного напряжения приведена на рис. 2. Основу схемы составляет трёхфазный вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) в статорных обмотках асинхронного двигателя (АД), широтно-импульсное регулирование (ШИР) напряжения в первичных обмотках которого осуществляется с помощью единственного транзистора $VT1$, установленного на выходе диодного моста $VD1$. Вторичные обмотки ВДТ включаются последовательно статорным обмоткам АД. Можно отметить, что при традиционном параллельном подключении этой обмотки требуемая установленная мощность трансформатора повышается по сравнению с ВДТ не менее, чем в 2

раза, что так же может быть причислено к достоинствам рассматриваемой схемы.

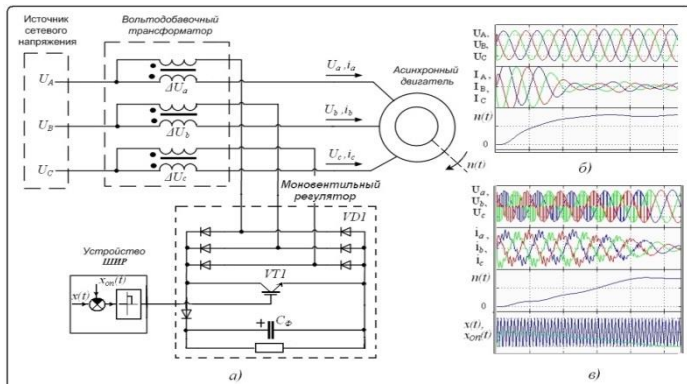


Рис. 2. Схема моновентильного электропривода (а) и осциллограммы режимов прямого (б) и плавного (в) пуска асинхронного двигателя

В зависимости от направления включения обмоток, фазные напряжения вольтодобавки ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c , могут служить для повышения или уменьшения результирующего напряжения в статорных обмотках двигателя, что может служить целям форсирования или демпфирования переходных процессов. В установившихся режимах назначением регулятора становится стабилизация статорного напряжения методом автоматического регулирования по отклонению. При соответствующем уменьшении коэффициента трансформации этот процесс может происходить при минимально необходимой вольтодобавке и таких же малых искажениях статорного напряжения и тока. Представленные на рис. 2 результаты компьютерного моделирования иллюстрируют применение данного устройства в режиме плавного амплитудного пуска АД. Процесс плавного наращивания статорного напряжения в этой схеме обеспечивается уменьшением встречного напряжения вольтодобавки. По сравнению с аналогом – тиристорным регулятором переменного напряжения исключается возможность прерывистого тока статорных обмоток, что ведёт к повышению пускового момента двигателя. Осциллограммы на рис. 2, в демонстрируют один из возможных алгоритмов пуска, предусматривающий первоначальную кратковре-

менную форсировку управляющего сигнала $x(t)$ с последующим монотонным приближением результирующего статорного напряжения к номинальному значению: $U_{a(b,c)}(t) = U_{A(B,C)}(t) - \Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow U_{сн}$ при $\Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow 0$. Сравнение режимов прямого (рис. 2, б) и плавного (рис. 2, в) пуска указывает на уменьшение броска пускового тока, в данном случае в 1.5 раза.

Четырёхквadrантный маловентильный электропривод с фазочередующимся импульсным регулированием статорного напряжения

Для расширения функциональных свойств маловентильного привода в состав ВДТ включается ещё одна первичная обмотка, снабжённая вторым транзисторным ключом VT2. При этом, если первая обмотка с ключом VT1 создаёт прямо чередующееся встречное напряжение вольтодобавки $-\Delta U_{a,b,c}$, то вторая обмотка индуцирует в общей вторичной обмотке согласное напряжение $+\Delta U_{a,b,c}$ с обратным чередованием фаз. Как видно из схемы рис. 3, это обеспечивается соответствующим перекрёстным подключением двух фаз второй обмотки к общему источнику сетевого напряжения.

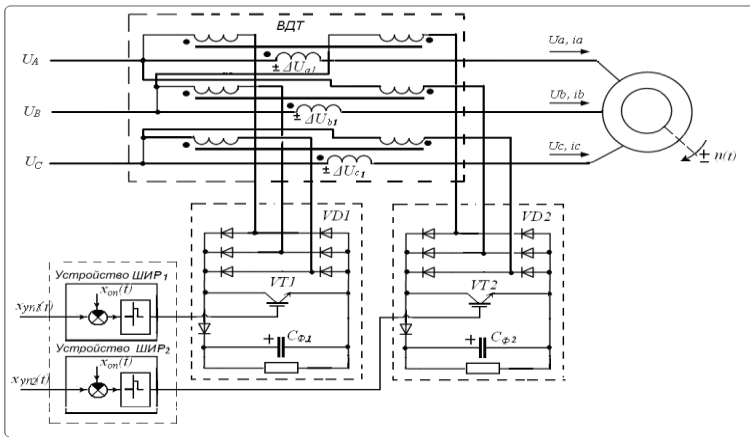


Рис. 3. Схема маловентильного импульсного регулятора напряжения в цепях 4-х квадрантного асинхронного привода

Приведённые на рис. 4 диаграммы знакопеременной скорости $\omega(t)$ подтверждают возникновение реверсивных свойств

Секция 5

привода с возможностью работы и регулирования во всех 4-х квадрантах механических характеристик (МХ). Показывается, что разгон и работа привода в 1 квадранте МХ происходят на интервале $0 - t_1$ в результате соответствующего изменения сигнала управления первым транзистором $x_{уп1} \rightarrow 0$, при этом сигнал управления вторым транзистором должен оставаться на нулевом уровне $x_{уп2} = 0$. Это обеспечит плавное нарастание прямо чередующегося 3-х фазного напряжения в обмотках двигателя. Для создания на интервале $t_1 - t_2$ тормозного режима первый сигнал должен оставаться на максимальном уровне $x_{уп1} = \max$, необходимым для компенсации прямо чередующегося сетевого напряжения, при этом второй управляющий сигнал следует увеличивать $x_{уп2} = var$, что приведёт к появлению во вторичной обмотке ВДТ, а значит и в статорных обмотках АД возрастающего напряжения с обратным чередованием фаз. Данный режим обеспечит переход АД во 2-й квадрант МХ с торможением противовключением. После снижения скорости до нуля двигатель перейдёт на интервале в 3-й квадрант МХ с последующим разгоном на интервале $t_2 - t_3$ в обратном направлении. Повторяющиеся на интервале $t_3 - t_4$ процессы торможения, а затем на интервале $t_4 - t_5$ разгона в прямом направлении будут происходить аналогично, при этом роль транзисторных ключей $VT1$ и $VT2$ взаимно поменяется.

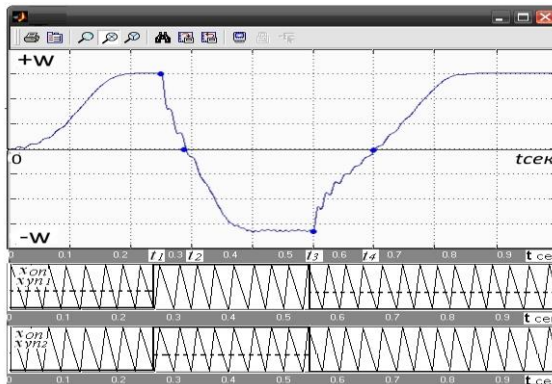


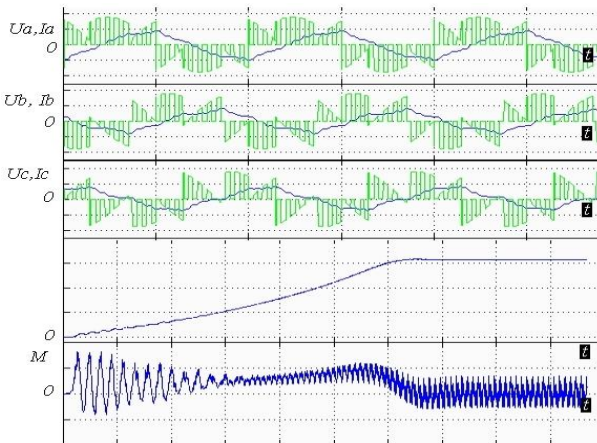
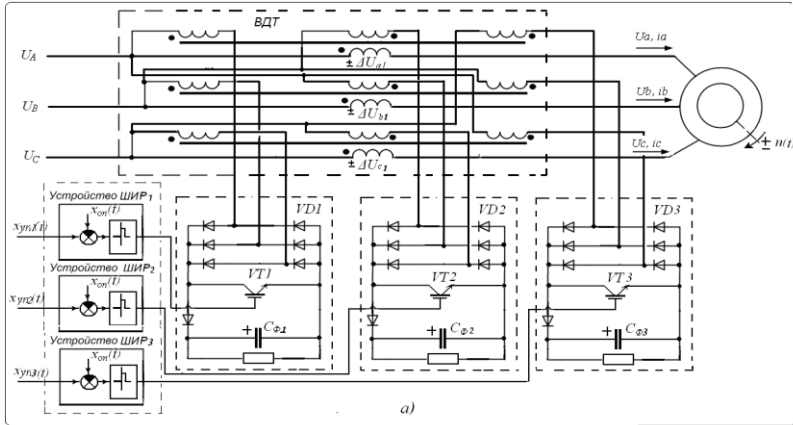
Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования асинхронного маловентильного электропривода в режиме межквadrанных переходов

***Частотно-регулируемый электропривод на основе мало-
вентильного циклоконвертора с комбинированной (фазо-
широтно-импульсной) модуляцией***

Введение в схему вольтодобавочного трансформатора 3-ей аналогично выполненной первичной обмотки с диодно-транзисторным коммутатором на элементах $VD3$, $VT3$, придаёт импульсному регулятору свойства циклоконвертора в составе частотно-регулируемого электропривода. Представленные на рис. 5 осциллограммы иллюстрируют создание в статорных обмотках АД частотно-регулируемого 3-х фазного напряжения. Процесс плавного регулирования частоты этого напряжения обеспечивается циклически чередующимся подключением трёх первичных обмоток ВДТ к общему источнику сетевого напряжения. Данные подключения сопровождаются индуцированием в общей вторичной обмотке 3-х фазного кусочно-синусоидального напряжения, образующегося из участков сетевого напряжения с меняющимся чередованием фаз. Регулирование обеспечивается изменением частоты указанных подключений в результате придания управляющим сигналам x_{yn1} , x_{yn2} , x_{yn3} двух значений: нулевого $x_{yn} = 0$ или максимального $x_{yn} = 1$. Так например, создание комбинации $x_{yn1} = x_{yn2} = x_{yn3} = 0$ приведёт к общему обнулению вольтодобавок, то есть к прямому подключению статорных обмоток к источнику сетевого напряжения с чередованием фаз А, В, С. При единичном коэффициенте трансформации комбинация $x_{yn1} = 1$; $x_{yn2} = 1$; $x_{yn3} = 0$ компенсирует напряжение сетевого источника той частью вольтодобавки, которая индуцируется первичной обмоткой с транзистором $VT1$, при этом статорное напряжение будет создаваться второй частью вольтодобавки, создаваемой включением транзистора $VT2$.

В результате статорные обмотки получают питание 3-х фазным напряжением, образованным чередованием фаз В, А, С и так далее. В свою очередь регулирование напряжения проводится на более высокой частоте переключений методом ШИР. Этот процесс сводится к периодическому обнулению статорного напряжения, что происходит без разрыва цепей тока статора. При этом регулирование происходит за счёт изменения длительности нулевых пауз, каждую из которых можно получить при комбинации $x_{yn1} = 1$; $x_{yn2} = x_{yn3} = 0$.

Секция 5



б)

Рис. 5. Схема маловольтового частотно-регулируемого электропривода (а), диаграммы фазных напряжений и токов в статорных обмотках асинхронного двигателя U_a, I_a ; U_b, I_b ; U_c, I_c , а также скорости $n(t)$ и момента $M(t)$ в пусковом режиме (б)

Выводы

1. Представленная конструкция маловольтового импульсного регулятора ведёт к упрощению силовых цепей асинхронного электропривода, создаёт условия для поддержания качества выходного напряжения при минимально-возможных искажени-

ях питающего напряжения, исключает потребление вентильным приводом «реактивной мощности сдвига», обеспечивает поддержание высокого электромагнитного момента за счёт недопущения режима прерывистого тока нагрузки.

2. Выполнение импульсного регулятора на основе одинаковых диодно-транзисторных модулей создаёт условия для получения унифицированного ряда маловентильных (ресурсосберегающих) электроприводов с меняющимися, согласно требованиям технологического процесса, функциональными свойствами, регулировочными и нагрузочными характеристиками.

3. Минимальное число вентильных элементов, а так же возможная минимизация габаритной мощности работающего на высокой частоте вольтодобавочного трансформатора, делают возможным размещение данного устройства в клеммной коробке асинхронного двигателя, частным предназначением которого в этом случае может стать режим экстремального регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров С.Н., Старостина Я.К. Пуско-регулирующие устройства для асинхронного электропривода на диодно-транзисторных модулях. Известия вузов. Электромеханика. 2015, вып. 4(540). С. 42–50.
2. Патент РФ №2294592. Устройство для плавного пуска асинхронного двигателя. // Д.С.Сидоров, С.Н. Сидоров. Оpubл. 27.02.2007 г.

Авторы:

Старостина Я.К., см. стр. 45.

Сидоров С.Н., Ульяновский государственный технический университет.

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Муртазин Т.Э., Титов В.Г., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

***Аннотация.** Предложена имитационная модель автономного частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением и контуром активной мощности электродвигателя. Приведены результаты моделирования, из которых видно, что реализация контура активной мощности позволяет эффективно ограничивать потребляемую от автономного источника мощность, обеспечивая стабилизацию параметров генерируемой энергии.*

***Ключевые слова:** векторное управление, имитационное моделирование, синхронный электропривод, система автономного электропитания, частотное регулирование.*

Автономные системы электроприводов находят применение там, где невозможно организовать электроснабжение от основной сети общего назначения. К ним можно отнести удаленные сельскохозяйственные предприятия, автономные системы, удаленные насосные станции и пр. Ввиду ряда преимуществ, наибольшее распространение на сегодняшний день получили установки типа дизель-генератор – двигатель переменного тока [1,2]. Вопросы снижения потребления топлива дизельным двигателем, а также повышения эффективности и надежности электропривода не перестают быть актуальными. При организации электроснабжения прочих потребителей от автономной электростанции, помимо мощного электропривода, особенно остро встают вопросы о поддержании надлежащего качества электроэнергии и бесперебойности [3–6].

Превышение потребляемой из генератора мощности свыше 105-110 % от номинального уровня может привести к перегрузке агрегата, снижению срока эксплуатации из-за длительной работы на предельных режимах, большому расходу топлива. А еще большее превышение и вовсе приводит к останову дизельного двигателя. Таким образом, система управления должна поддерживать скорость вращения дизельного двигателя и напряжение на обмотке возбуждения на номинальном значении для поддержания частоты и амплитуды выходного напряжения

Секция 5

соответственно. Для ограничения и регулирования потребляемой электроприводом мощности предлагается использование векторного управления синхронным электродвигателем с контуром мощности. Возможности векторного управления позволяют вычислять момент без применения сложных систем датчиков [7,8]. Для этого необходимо знать лишь потокосцепление ротора, которое остается постоянным для синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе, и значения проекции тока статора на ось q , которое определяется путем координатных преобразований сигналов с датчиков тока статора. Таким образом, при помощи датчиков тока и положения можно вычислить активную мощность на валу и сигнал обратной связи на регулятор мощности.

Составление имитационной модели и моделирование будет производиться в ПО Matlab Simulink [9,10]. Номинальная мощность дизельного двигателя равна 7000 кВт. Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур активной мощности. Структура модели представлена на рис. 1, 2.

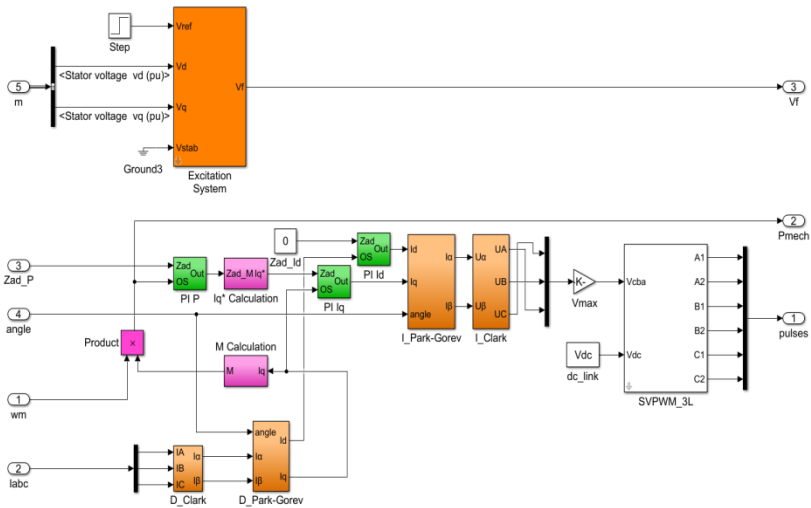


Рис. 1. Структура системы управления

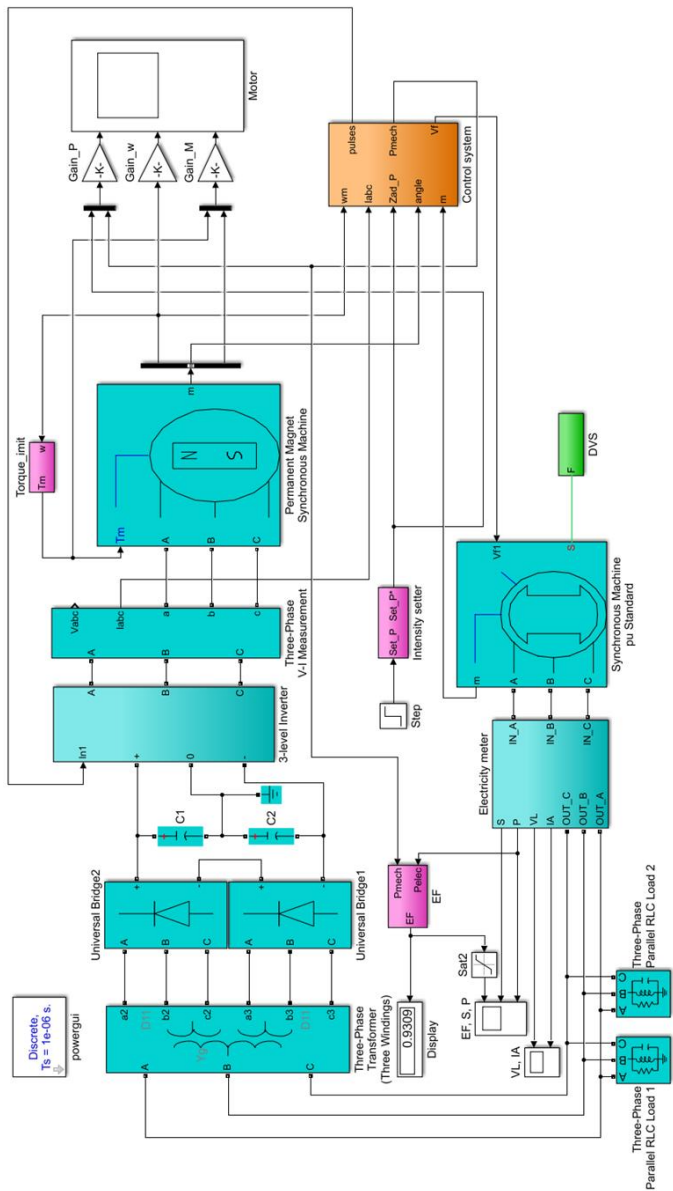


Рис. 2. Модель автономной системы синхронного электропривода

Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, то можно прибегнуть к методу подбора [11]. Воспользовавшись одним из методов подбора, определили коэффициенты регуляторов токов и мощности. Номинальные параметры: механическая мощность на валу двигателя – 4650000 Вт, скорость вращения – 62.83 рад/с, момент двигателя – 74000 Нм, напряжение – 6300 В, ток двигателя – 470 А, полная мощность двигателя – 5150000 ВА.

Результаты и обсуждение

Результатом моделирования являются временные диаграммы переходных процессов системы при пуске электродвигателя под нагрузкой центробежного характера с заданием 100 % активной мощности на валу (рис. 3–5).

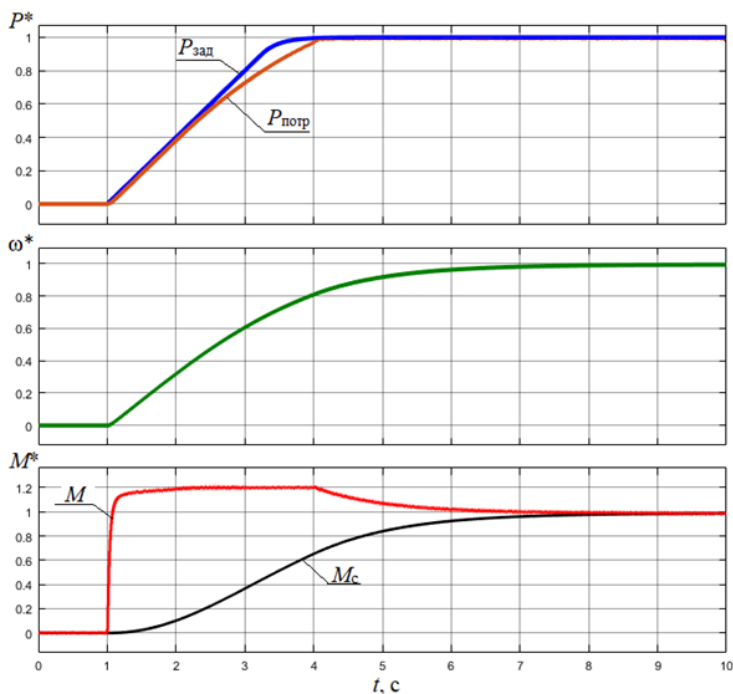


Рис. 3. Переходные процессы активной мощности, скорости и момента синхронного электродвигателя при пуске

Секция 5

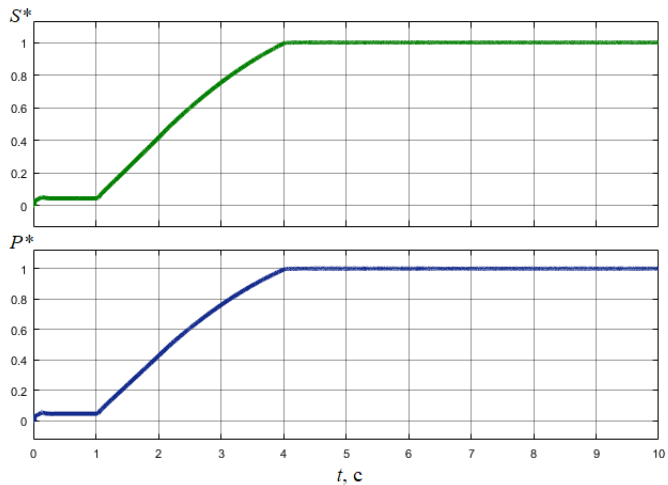


Рис. 4. Переходные процессы потребляемой электроприводом полной и активной мощности при пуске двигателя

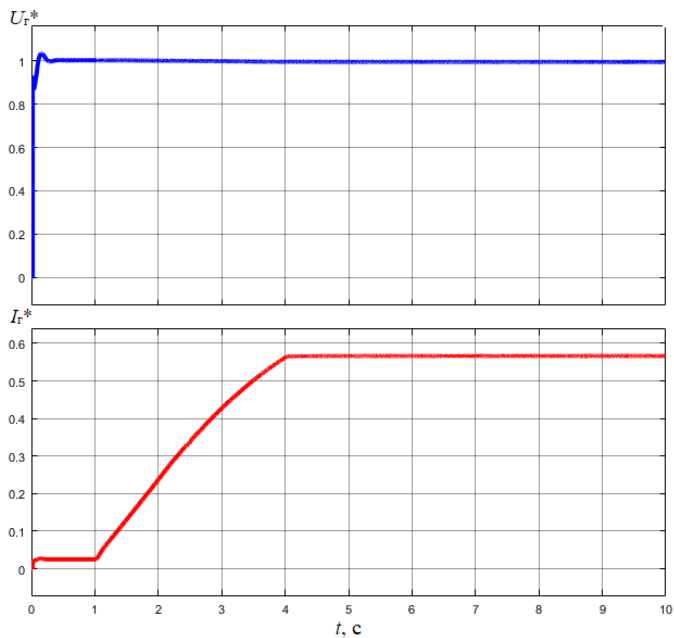


Рис. 5. Переходные процессы напряжения и тока синхронного генератора при пуске двигателя

Из рисунков видно, что активная мощность на валу двигателя с практически отсутствующей динамической ошибкой плавно выходит на установившееся значение без скачков и перерегулирования. Начальный наброс момента электродвигателя практически не повлиял на работу генератора и качество производимой электроэнергии. Потребляемая из генератора мощность также без скачков вышла на установившееся значение, не превышая ограничения в 105%. По показаниям дисплея (рис. 2) видно, что КПД электропривода в установившемся режиме составляет 93,09%.

Выводы

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант автономной системы частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением отвечает заявленным требованиям к энергетическим, механическим и электрическим параметрам. Использование контура активной мощности позволило исключить скачки потребляемой мощности в пусковых режимах, тем самым обеспечив бесперебойность и повысив надежность дизель-генераторной установки. В дальнейшем планируется интегрировать в предложенную единую систему управления нейронные сети в качестве адаптивных нейросетевых регуляторов и систем-ассистентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алешков О.А., Малоземов А.А.* Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе // Ползуновский вестник. 2009. N 1-2. С. 199-209.
2. *Григорьев А.В., Колесниченко В.Ю.* Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. N 6 (28). С. 39–43.
3. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 265 с.
4. *Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В.* Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. №4 (83). С. 190-204.

5. *Михеев Е.А.* Частотное регулирование электропривода // Международный научный журнал «Символ науки», N 11-3/2016.

6. *Терехов В.М.* Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. В.М. Терехова. –М.: Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.

7. *Фролов В.Я., Жилиготов Р.И.* Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92

8. *Калачев Ю.Н.* Векторное регулирование (заметки практика). – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 72 с.

9. *Дьяконов В.П.* Simulink 5/6/7: Самоучитель // – М.: ДМК Пресс, 2008. 784 с.: ил.

10. *Дьяконов, В.П.* MATLAB. Полный самоучитель // – М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.: ил.

11. *Вадутов О.С.* Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / сост. О.С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.

Авторы:

Муртазин Тимур Эмильевич, аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева по профилю 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». E-mail: tm.murtazin@yandex.ru.

Титов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Тема диссертации: «Асинхронно-вентильное нагружающее устройство для испытания двигателя внутреннего сгорания», 1991 г. E-mail: eos@nnti.ru.

РАЗРАБОТКА АСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

Осипов Л.Ю., Сорокин С.Е., Батраков И.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Цель статьи заключается в разработке автоматизированной системы управления на языке программирования C# на примере АСУ для фрезерного станка.*

***Ключевые слова:** АСУ, C#, автоматизация.*

Проблема автоматизации в последнее время привлекает все более пристальное внимание со стороны работодателей. В нынешний момент на рынке труда все сложнее найти низкооплачиваемого рабочего для выполнения несложных работ, например, подаче заготовки и выполнения фрезерных работ по листовым материалам. Решение этой проблемы – автоматизировать вышеописанные работы и перейти к компьютерному мышлению. Для определения основных возможностей необходимо определить каким требованиям должна отвечать АСУ:

1. Многофункциональность управления;
2. Возможность длительной поддержки и обновлений;
3. Высокая частота обновления данных;
4. Понятный пользователю интерфейс;
5. Вывод основных параметров;
6. Контроль ошибок.

Разработка автоматизированной системы управления будет происходить на языке программирования C# с библиотеками .NET Framework 4.8. Выбор был сделан из-за огромного выбора библиотек. Как пример можем рассмотреть библиотеку *System.Windows.Threading*, которая позволяет добавить таймер внутри АСУ, который будет выполнять процесс записи происходящих событий каждое заданное количество миллисекунд.

Графическую оболочку необходима для интуитивно понятного управления основными параметрами. User-Friendly интерфейса можно добиться описанием каждого индикатора и кнопки. Мы добавили вывод основных входных и выходных данных с возможность настройки параметров для простоты и удобства пользователя.

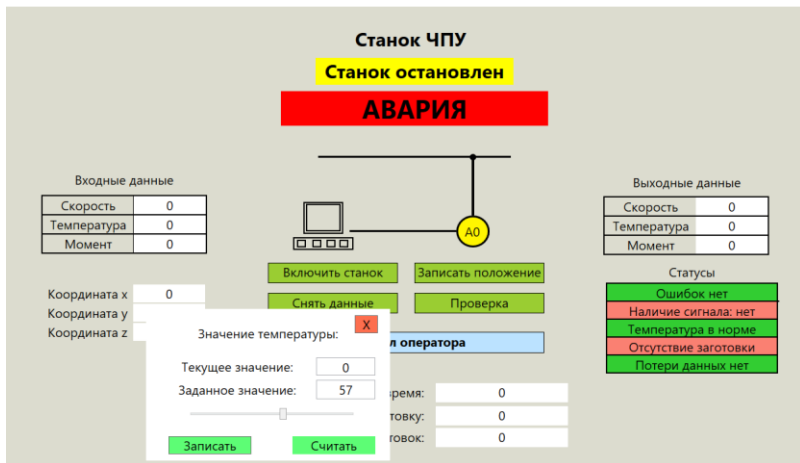


Рис. 1. Внешний вид АСУ

Для того, чтобы был доступ к логам произошедших событий и управления, нам необходимо добавить обработчики действий и обратную связь со станком, которым будем управлять. Обработчики добавить через `private void Button_Click(Object sender, EventArgs e)`, где `Button` – имя кнопки, которую хотим использовать. Так же добавим обновление индикаторов в зависимости от статуса, передаваемого станком. Добавим систему регистров с помощью файла, к которому будем обращаться. Настроим индикаторы по статусам в зависимости от ошибки. Пример: `Status0` – Станок в работе. `Status1` – Станок Остановлен.

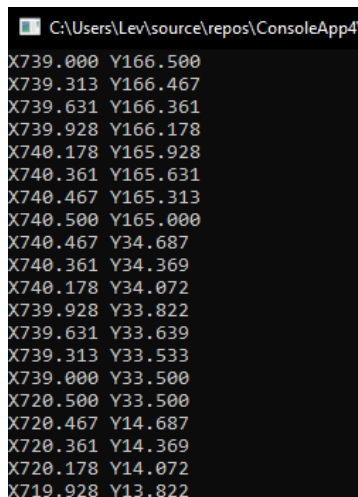
Удобный контроль – основная функция АСУ. Оператору ввода данных необходимо посекундно знать что было со станком во время ошибки, остановки, либо аварии. Для этого мы с помощью выше описанного таймера настроим выгрузку данных в csv файл, где разделителем будет служить «,». Так же необходимо добавить контроль за координатой и основными параметрами – моментом, скоростью, температурой. В программной части это будет выглядеть так. Выбираем файл, куда будет производиться запись, добавляем проверку на наличие файла, настраиваем запись с разделителями, такое же делаем для координат и параметров в другие файлы.

Секция 5

9652	12.11.2023 12:16:07				
9653	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9654	12.11.2023 12:16:07				
9655	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9656	12.11.2023 12:16:07				
9657	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9658	12.11.2023 12:16:07				
9659	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9660	12.11.2023 12:16:07				
9661	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9662	12.11.2023 12:16:08				
9663	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9664	12.11.2023 12:16:08				
9665	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет
9666	12.11.2023 12:16:08				
9667	Ошибка нет	Наличие сигнала: нет	Температура в норме	Отсутствие заготовки	Потери данных нет

Рис. 2. Запись событий

Так как на данный момент формирование координат, по котором должна продвигаться фреза формируется в программах, то необходимо добавить поддержку файлов с расширением спс. Добавим программу, которая будет выводить построчно данные, чтобы убедиться, что работает верно, далее с помощью уже разделенных строк будем откидывать String часть строки, вынимая только численные значения, конвертируя все в тип float для отображения знаков после запятой. Обработку сделаем так же на C# в отдельном модуле, к которому в последствии будем обращаться.



```
C:\Users\Lev\source\repos\ConsoleApp4\
X739.000 Y166.500
X739.313 Y166.467
X739.631 Y166.361
X739.928 Y166.178
X740.178 Y165.928
X740.361 Y165.631
X740.467 Y165.313
X740.500 Y165.000
X740.467 Y34.687
X740.361 Y34.369
X740.178 Y34.072
X739.928 Y33.822
X739.631 Y33.639
X739.313 Y33.533
X739.000 Y33.500
X720.500 Y33.500
X720.467 Y14.687
X720.361 Y14.369
X720.178 Y14.072
X719.928 Y13.822
```

Рис. 3. Вывод и передача координат

Так же необходимо обработка принятого сигнала с STM32, которая будет связующим звеном между АСУ и двигателем. С STM32 мы получаем интовое значение шагов, которые были выполнены, мы же уже будем выводить нынешнюю координату. Следовательно учитывая количество совершенных шагов мы из массива вытаскиваем значение в int формате (причина этому шаг, который является разницей значений без запятой, то есть с увеличенной разрядность на количество знаков после запятой), для вывода в индикатор мы должны его преобразовать 2 раза. Первый раз из int во float, разделив на 1000, для получения правдивой абсолютной координаты, после перевода в String для заноса в наш индикатор, который сделан из TextBlock. Используем библиотеки *Windows.Input* и *Windows.Controls*.

После того как все настроено, нам необходимо задать стартовые значения всех индикаторов и скрываемых полей настройки параметров, для исключения несостыковки до запуска таймера и обработчиков действий. Заносим нужные для данных в сразу после *InitializeComponent()*. Прописываем то, что должно прогрузиться до того, как мы увидим картинку и интерфейс. Пример: статусы должны начать записываться сразу, для предотвращения потери данных. Text в наших индикаторах, который зависит от бита, должен тоже сразу прогружаться и заменяться. Оператор не должен видеть нули при включенном станке и загруженной АСУ.

Выводы

Была показана разработка автоматизированной системы управления, возможности созданной программы практически безграничны при наличии всех датчиков, которые будут передавать состояния станка.

Авторы:

Осипов Лев Юрьевич, студент 3-го курса факультета ЭиЭТ ЧувГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: osipov-leva@mail.ru.

Сорокин Степан Евгеньевич, студент 3-го курса факультета ЭиЭТ ЧувГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: sorokin-stepa@mail.ru.

Батраков Иван Сергеевич, студент 3-го курса факультета ЭиЭТ ЧувГУ им. И.Н. Ульянова.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В МАТЛАВ

Каримов И.Р., Худжандский политехнический институт
Таджикского технического университета имени академика
М.С. Осими, г. Худжанд, Республика Таджикистан

***Аннотация.** С целью исследования рабочих режимов регулируемого электропривода переменного тока, разработана компьютерная модель, с помощью которой можно построить статические механические характеристики при управлении по частотному закону $U/f = \text{const}$. Кроме этого в данной модели можно исследовать работу электропривода в режиме прямого пуска, что позволит оценить пусковые характеристики электропривода.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, электропривод, преобразователь частоты, механическая характеристика, скалярное управление.*

Сегодня регулируемые электроприводы (РЭП) широко используются в различных механизмах и оборудовании промышленности, где достойно выполняют свои технические функции [1]. Современное производство требует внедрения новых высококачественных и энергосберегающих технологий. Одним из основных компонентов РЭП являются асинхронный двигатель (АД) и частотный преобразователь (ПЧ), благодаря чему такую систему управления электропривода (СУЭП) именовали ПЧ – АД [2, 3]. Однако с повышением требований к технологиям производства и развитием методов управления, усложнились подходы к правильному выбору и настройке данной системы для ЭП механизмов. Выбор компонентов ЭП как ПЧ требуют значительных финансовых затрат, и потому перед их выбором, необходимо провести анализ совместимости статических характеристик ЭП с преобразователем [4]. Известно, что эффективность и энергосбережение использования РЭП зависит от соответствия характера нагрузки механизмов и глубины регулирования ЭП [5]. Если глубина регулирования ЭП в каком либо производственном объекте не значительна, то эффект энергосбережения тоже будет не большим. В этом случае внедрение РЭП не рекомендуется, или требуется дополнительные исследования.

Секция 5

Одним из эффективных и мало затратных методов исследования ЭП является компьютерное моделирование.

Для моделирования РЭП выбрали систему MATLAB / Simulink, библиотеку SimPowerSystem, где расположены элементы электрических цепей и систем [6, 7]. Для исследования ЭП выбрали АД с короткозамкнутым ротором марки 4А180М4УЗ, параметры которого приведены в таблице. Данный тип двигателей хорошо себя зарекомендовали уже давно, и они по сей день широко применяются для различных электроприводов механизмов и машин.

Таблица

Паспортные и расчетные данные АД марки 4А180М4УЗ

№	Величина	Значение
1	Номинальное скольжение, s_n	0,02
2	Индуктивность статора и ротора, $L_{is} = L_{ir}$, (Гн)	$0,9434 \cdot 10^{-3}$
3	Взаимоиндукция, L_m , (Гн)	0,05328
4	Активное сопротивление статора, R_s , (Ом)	0,04294
5	Активное сопротивление ротора, R_r , (Ом)	0,0668
6	Номинальный момент, M_n , Н·м	195
7	Максимальный момент, M_m , Н·м	450
8	Номинальный ток, I_n , А	56
9	Номинальный угловой скорость, ω , рад/с	153,93
10	Номинальная мощность, P_n , кВт	30,00
11	Коэффициент полезного действия, η	0,91
12	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,9
13	Кратность максимального момента, k_M	2,3
14	Кратность пускового тока, k_I	6,5
15	Момент инерции, J , кг·м ²	$23,3 \cdot 10^{-2}$

С целью исследования РЭП и расчёта с дальнейшим построением механических характеристик (МХ) АД, при частотном управлении по закону $U/f = \text{const}$ разработали компьютерную модель, которая приведена на рис. 1.

Секция 5

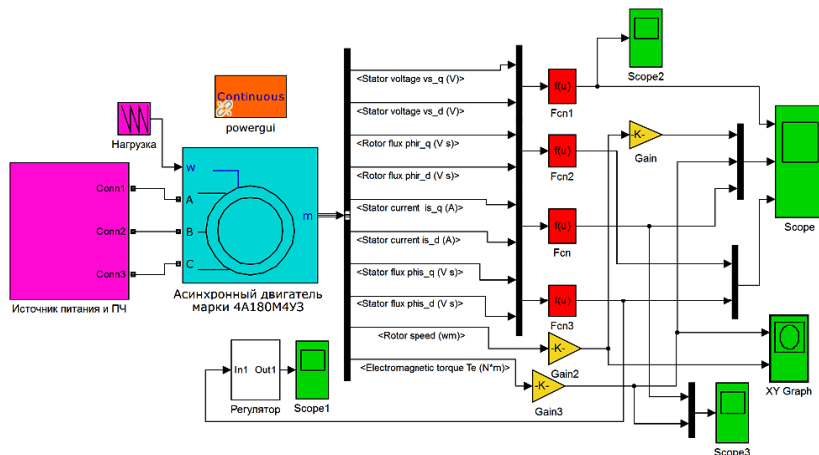


Рис. 1. Компьютерная модель для расчёта и построения МХ АД при частотном скалярном управлении

Результаты моделирования при прямом пуске АД приведены на рис. 2 и 3.

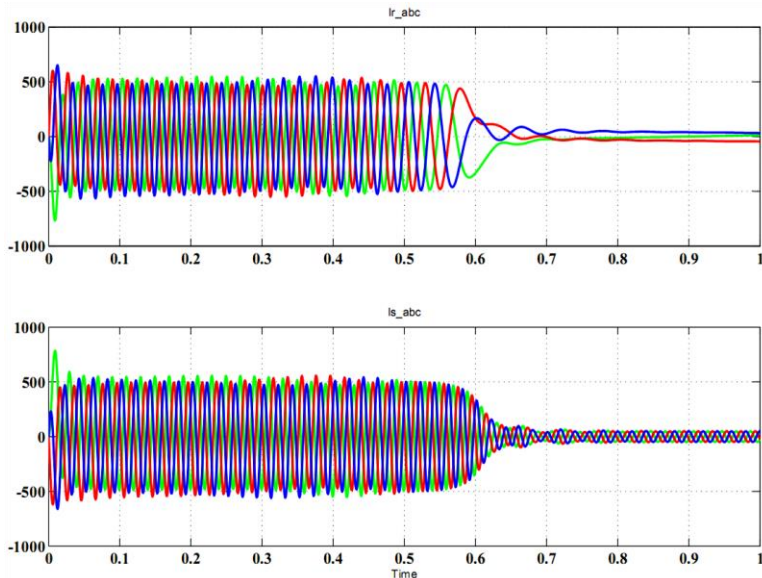


Рис. 2. Графики токов ротора и статора АД

Секция 5

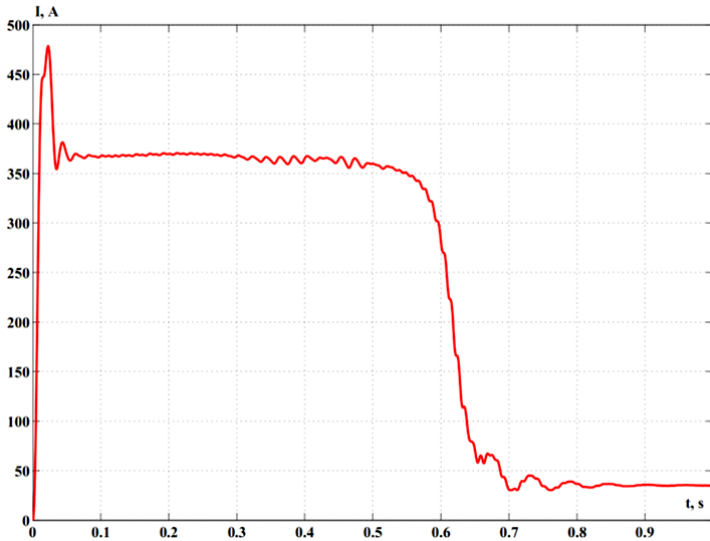


Рис. 3. График действующего значения тока статора АД

В разработанной модели для исследования РЭП, основными элементами являются «Источник питания и ПЧ» и «Асинхронный двигатель». Источник питания снабжает ПЧ симметричным трехфазным напряжением 400 В. В качестве электродвигателя выбрали АД той же марки, что у нерегулируемого ЭП (4А180М4УЗ). С целью расчёта и построения механических характеристик АД при частотном скалярном управлении, на механический вход двигателя «w» подается линейно изменяющаяся нагрузка с незначительной интенсивностью. На выходе двигателя берутся сигналы электромагнитного момента двигателя « T_e » и сигналы угловой скорости АД, затем оба сигнала задаются на вход «XY Graph». В результате, формируется механическая характеристика АД при частотном законе U/f – управления. Изменение задания частоты напряжения, подаваемые на обмотку статора двигателя, осуществляется через блок «Источник питания и ПЧ». Частотный закон U/f – управления аналитически можно выразить следующим образом:

$$U_1 = \frac{U_{\text{ф.ном}}}{\omega_{0,\text{ном}}} (\omega_0 \cdot \omega_{0,\text{ном}}),$$

Секция 5

где ω – значение частоты напряжения в относительных единицах.

По идее, при частоте питания 50 Гц напряжение имеет значение 400 В, при 25 Гц, напряжение 200 В, так работает рассматриваемый частотный закон управления $U/f = \text{const}$. Результаты моделирования приведен на рис. 4.

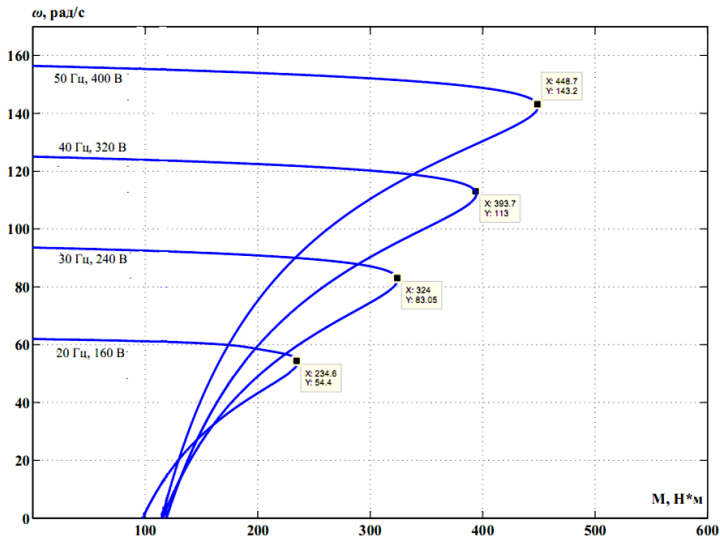


Рис. 4. Семейства механических характеристик ЭП при частотном управлении по закону $U/f = \text{const}$

Выводы

Как показали результаты моделирования, разработанная компьютерная модель на достаточном уровне симулировал процессы, происходящие в реальной ЭП, что свидетельствует о правильно разработанном модели. Механические характеристики ЭП при частотном управлении по закону $U/f = \text{const}$ показанные на рис. 4 совпадают с реальными характеристиками ЭП при таком способе регулирования. Таким образом, мы получили модель, по которой можно на стадии проектирования ЭП исследовать возможность и эффективность использования ПЧ по способу скалярного управления в ЭП различных механизмов и машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.

2. Каримов, И.Р. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети / Ш. Т. Дадабаев, Е. И. Грачева, И. Р. Каримов, С. Валтчев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 1(49). – С. 3–15.

3. Вохидов, А. Д. К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема / А. Д. Вохидов, Ш. Т. Дадабаев, Ф. М. Разоков // Надежность. – 2016. – Т. 16, № 4(59). – С. 36–39. – EDN YUINKZ.

4. Дадабаев, Ш. Т. Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 179–184. – EDN EDWXTL.

5. Разоков, А. Р. Постановка задачи по оптимизации работы текстильного электрооборудования при жарком климате / А.Р. Разоков, Ш. Дадобоев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 11. – С. 58-59. – EDN RKQGSR.

6. Алиев Д.С., Джураев Д.С. Применение энергоэффективных машин переменного тока. В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы I Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 16–17 ноября 2017 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2017. – С. 11–15.

7. Дадабаев, Ш.Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска / Ш.Т. Дадабаев // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): труды Международной научно-технической конференции, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 76–80. – EDN YOWNQF.

Автор

Каримов Ибодкул Рахимкулович, старший преподаватель, Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Республика Таджикистан, г. Худжанд, ул. И. Сомони 226. karimov.ibodkul@mail.ru.

VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИМ РАЗВИТИЕМ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРВИСОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Грабчак Е.П., Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Логинов Е.Л., Ситуационно-аналитический центр Минэнерго России, г. Москва, Россия

***Аннотация.** Предлагается разработать подходы к поддержке процессов и процедур комплексного управления научно-техническим развитием энергетики России с опорой на новые сервисы работы человеко-машинных систем с элементами искусственного интеллекта в контексте приложения к моделированию процесса оперирования выбором [реализацией нужд покупателей сложного энергетического оборудования и техники при заказах-закупках-поставках] энергетических компаний на основе прогнозирования их будущих потребностей.*

***Ключевые слова:** энергетика, управление, человеко-машинная система, интеллектуальные сервисы, цифровые технологии.*

Введение

В настоящий период рамках концепций управления научно-техническим развитием энергетики интегрировано большое количество современных научно-технических, методологических, организационных и технологических направлений. Однако, задача не решена ни в теоретическом, ни в практическом аспектах [1–2].

Конкретная научная задача

В настоящий период конкретная научная задача заключается в разработке научной проблемы управления научно-техническим развитием отрасли на основе регулирования кооперативного поведения организационных агентов (организатур, включающих людей и компьютерные системы).

Ключевым отличием является учет влияния ранее не существовавшего фактора – возможности конвергентного объединения информационных, телематических и вычислительных сервисов для возможности сетевидческой интеграции данных с новыми коммуникационными интерфейсами, опирающимися на цифровые технологии с опорой на новые сервисы (интеллектуальные регуляторы) работы человеко-машинных систем [3-5].

Требуется разработать подходы к поддержке процессов и процедур комплексного управления различными аспектами научно-технического развития энергетики России через применение агент-ориентированного подхода с опорой на новые сервисы работы человеко-машинных систем. То есть, предлагается построение регуляторов для управления сложными объектами с десятками переменных состояния и управляющих параметров) в контексте приложения к моделированию процесса оперирования выбором (при заказах-закупках-поставках) энергетических компаний на основе прогнозирования их будущих потребностей, – реализуется позиционирование в определенном сегменте научно-технической суперсистемы включая как ключевые тренды научно-технического развития энергетики России, так и конкретные линейки прикладных технических решений и пр.

Ключевые характеристики технологии

Целесообразно внедрение нейросети (например, разработанной на основе алгоритма растущего нейронного газа с фактором полезности нейронов) для фильтрации данных, ситуационного распознавания обстановки и идентификации целей с постановкой новых или уточнением текущих задач управления в системе приобретения покупателями оборудования и иных изделий в целях импортозамещения. Здесь необходимо конструктивная модернизация человеко-машинной среды в отношении научно-технического развития энергетики России, принятия решений и операционной реализации агентно ориентированного подхода к анализу и упорядочению – в условиях больших потоков зашумленных и неоднозначных данных – процессов и процедур создания энергетического оборудования и техники с качественно новыми возможностями через сосредоточение в области пионерных научно-технических разработок.

Требуется разработать принципиально новую информационно-аналитическую технологию по реализации агентно ориентированного подхода к регулированию кооперативного поведения агрегированных групп организационных агентов (оргструктур, включающих людей и компьютерные системы), реализуемую в системах управления научно-техническими процессами. Базой для планирования является возможность анализа параметров состояний научно-технических организаций, инженеринговых компаний, а также энергомашиностроительных и приборостроительных предприятий.

В основе оперирования ресурсами лежит внедрение новых сервисов работы человеко-машинных систем (куда входят: люди, цифровые двойники, интеллектуальные сети, системы искусственного интеллекта). Принципиально важным является использование нейросети в рамках единой цифровой модели с анализом иерархичной структуры и внутрисистемных связей как базы определения путей создания информационно-сетевой среды для решения задач управления в условиях действия известных, прогнозируемых и неизвестных возмущений.

Выводы

Предлагается детектирование и интерпретация явных и латентных состояний оргструктур и поддержки процессов взаимодействия организационных агентов, позиционированных в научно-технической суперсистеме энергетики России как пуле квазистационарных и нестационарных динамических объектов, подверженных глубоким параметрическим возмущениям с ориентацией на построение регуляторов для управления сложными объектами с десятками переменных состояния и управляющих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Грабчак Е.П., Григорьев В.В., Логинов Е.Л.* Выполнение комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла в энергетике: формирование интегральной цепочки от фундаментальной науки через НИОКР к консолидированному (пакетному) отраслевому заказу // *Энергетик*. 2020. № 5. С. 3-6.

2. *Грабчак Е.П., Епишкин И.И., Логинов Е.Л.* Императивы трансформации отраслевого управления, адаптированного к возможным

чрезвычайным ситуациям, в условиях современной структуры энергетики и в перспективе // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. № 3. С. 114-119.

3. *Грабчак Е.П., Логинов Е.Л.* Проблемы предотвращения катастроф при нарушении ресурсообеспечения в системах критической инфраструктуры в условиях с низкой достоверностью информации и неопределенностью развития ситуации // Фундаментальные основы механики. 2023. № 11. С. 73-75.

4. *Грабчак Е.П., Логинов Е.Л., Чиналиев В.У., Епишкин И.И.* Управление развитием сложных научно-технических комплексов на основе интеллектуальных цифровых платформ (реализация компетенций Госкомитета СССР по науке и технике в условиях цифровой экономики). – М.: ИНЭС, 2023. – 504 с.

5. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Логинов Е.Л.* Применение экономико-математических методов и моделей оптимального планирования в цифровой экономике будущего (ЦЭМИ АН СССР и ЦЭМИ РАН: прогностическая интерпретация и развитие научного наследия нобелевских лауреатов Л. В. Канторовича и В. В. Леонтьева). – М.: Центральный экономико-математический институт РАН, 2022. – 248 с.

Авторы:

Грабчак Евгений Петрович, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН. В 2004 году окончил магистратуру Московского физико-технического института по специальности «прикладная математика и физика». В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Организационно-экономический механизм управления технико-экономической эффективностью Единой энергетической системы России». E-mail: grabchak.euge@gmail.com.

Логинов Евгений Леонидович, доктор экономических наук, профессор РАН, начальник экспертно-аналитической службы Ситуационно-аналитического центра Минэнерго России, заместитель директора Института экономических стратегий (ИНЭС). В 1989 году окончил экономический факультет Кубанского государственного университета по специальности «планирование промышленности», в 2004 году защитил докторскую диссертацию на тему «Стратегическое оперирование инвестиционными факторами». E-mail: loginovel@mail.ru.

ОБЗОР СИСТЕМЫ ДВИЖЕНИЯ И УЧЁТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА МАЛЫХ СБОРОЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Четвериков С.В., ООО «Амадон», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье рассматривается технология формирования серийных номеров электротехнических и электронных изделий и применение данной системы для учёта и движения на предприятиях с небольшими объёмами выпуска. Цель статьи – разработка простой, информативной и современной системы маркировки и учёта электронной и электротехнической продукции.*

***Ключевые слова:** сериализация, маркировка, серийный номер, системы учёта товарных единиц.*

В настоящее время массовое производство электротехнических средств имеет довольно разрозненный и разнообразный характер. Если вести речь о малых сериях и небольших предприятиях или отделах, то очень многие производственные процессы сегодня лишились стандартов некоторых технологических операций и перешли в режим «самоопределения» касаясь правил маркировки и учёта продукции. Рассматривая проблему организации движения и учёта, с которыми рано или поздно сталкивается любой руководитель, хотелось бы описать авторские наработки в этой области, которые, вкуче с опытом присвоения номеров системы GTIN и SGTIN, сериализации данных и работы с государственными стандартами, удалось привести к наработанной технологии. Описываемые наработки небезуспешно функционируют продолжительное время на реальном участке сборки электронных устройств и, в значительной мере, упростили работу предприятия в целом.

Базой для построения описываемой системы является опыт участия в кампании маркировки и сериализации отдельных видов продукции, которая была недавно запущена в нашей стране, ГОСТ Р 2.201-202X первой редакции [1], а также наблюдения в ходе собственных изысканий по данному вопросу.

Согласно ГОСТ Р 2.201-202X, каждому изделию должно быть присвоено уникальное обозначение, регламентируемое и

Секция 6

разрабатываемое самим производителем. В документе рассматриваются 2 основных способа обозначений: обезличенный и объектно-ориентированный. Обезличенный способ имеет в своём составе классификационные характеристики изделия, в то время как объектно-ориентированный указывает непосредственно вид изделия и его связи с другими изделиями. Для рассматриваемого в данном труде случая остановимся на расшифровке обезличенного способа обозначений (рис. 1).



Рис. 1. Расшифровка обозначения изделия обезличенным способом по ГОСТ Р 2.201-202X

Система маркировки товаров GTIN (Global Trade Item Number) и её подвид SGTIN (Single Global Trade Item Number) предназначаются, в основном, для товаров народного потребления. Маркировка наносится непосредственно на упаковку продукции, как групповую (например, общий короб для определённого количества единиц продукции), так и индивидуальную (упаковка каждого отдельного изделия). Исходно GTIN представляет собой штрихкод с четырнадцатизначным наполнением, структурированным по образцу схемы [3] показанному на рис. 2.



Рис. 2. Расшифровка кода системы маркировки GTIN

Основные блоки информации соответствуют распространённому стандарту маркировки EAN-13 [2] с некоторыми изменениями. В сравнении с рассмотренным выше ГОСТ [1], маркировка GTIN включает в себя также и дополнительные данные. В частности в коде указаны: уровень упаковки (единичная или индивидуальная, групповая и транспортная – предназначенная для логистических процедур), код страны-изготовителя (так как система является международной), контрольная цифра в конце кода (позволяет подтвердить правильность считывания кода, вычисляется при помощи простых математических действий). В случае необходимости индивидуального учета каждого продукта, на вторичную (потребительскую) упаковку наносится маркировка SGTIN, то есть индивидуальный код произведенной единицы, который добавляет к уже имеющимся четырнадцати символам GTIN дополнительные тринадцать символов индивидуального кода [3].

Поскольку в области производства электрических и электронных аппаратов чаще всего готовая продукция является функционально законченным и самостоятельным изделием, представляет интерес создание некоего симбиоза вышеописанных двух методов маркировки и обозначений. Если ГОСТ Р 2.201-202X имеет в своем составе отсылку обозначения продукции к родственному обозначению в КД, то системы GTIN и SGTIN ссылаются уже, непосредственно, на учетные, логистические и товарно-потребительские формы.

Для максимальной информативности, индивидуальный QR-код должен состоять из следующих элементов:

1. Код разработчика – уникальный четырехбуквенный идентификатор предприятия-производителя.

2. Классификация по ЕСКД – отсылка к конструкторской документации, фактически описание категории произведенного изделия, 6 цифр (например, для нейтрального герметизированного реле код классификатора будет 647611 [4]).

3. Дата выпуска – 6 цифр, включающих месяц и год (в формате ММГГГГ).

4. Код-описание изделия (префикс серийного номера) – описание модели и модификации продукта зашифрованное в короткую цифро-буквенную комбинацию.

Секция 6

5. Индивидуальный номер изделия (суффикс серийного номера) – 5 цифр серийного номера (от 00001 до 99999).

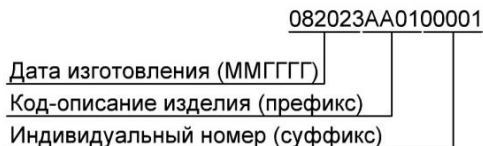
6. Контрольная цифра – предназначена для проверки правильности считывания информации. Представляет числовой результат простой арифметической операции с предыдущими знаками.

Разбор QR-кода на примере реле РЭК-23 модификации РФ4.500.472-00 показан на рис. 3, а.

Для визуализации персоналом непосредственно серийного номера, предполагается укороченный серийный номер (рис. 3, б), расположенный ниже QR-кода в формате: дата выпуска, код-описание (префикс), индивидуальный номер (суффикс). Также с левой стороны от QR-кода, под углом 90° к серийному номеру должно быть расположено товарное название изделия. Это необходимо для работы персонала с изделиями, считывания базовой информации без использования специальных средств, в случае необходимости.



а



б

Рис. 3. Расшифровка серийных номеров на примере реле РЭК-23

Для описания префиксного код-описания данного изделия составим простую таблицу (таблица) цифро-буквенных обозначений (рассматриваемый пример с префиксом АА01).

Код-описание модели и модификации изделия

Код	Модель	Код	Модификация (исполнение)
АА	РЭК-23	01	РФ4.500.472-00
АА	РЭК-23	02	РФ4.500.472-01
АА	РЭК-23	03	РФ4.500.472-02
АА	РЭК-23	04	РФ4.500.472-03
АА	РЭК-23	05	РФ4.500.472-04
АА	РЭК-23	06	РФ4.500.472-05
АА	РЭК-23	07	РФ4.500.472-06
АА	РЭК-23	08	РФ4.500.472-07
АА	РЭК-23	09	РФ4.500.472-08

Пример готовой наклейки с QR-кодом, серийным номером и товарным наименованием для реле РЭК-23 модификации РФ4.500.472-00 показан на рис. 4.



Рис. 4. Готовая наклейка для маркировки изделий

Данная наклейка должна быть распечатана в трёх экземплярах и наклеена на само изделие, гарантийный талон (в специально отведенном поле), а также на индивидуальную упаковку продукта.

Рассмотрим дальнейший процесс выхода готового, собранного и укомплектованного электротехнического изделия.

Первично, изделие после этапа финальной сборки и выходного контроля попадает на стол (или участок) упаковки. В ходе данной процедуры изделие должно быть укомплектовано паспортом, гарантийным талоном, комплектующими или запасными частями (если таковые предусмотрены комплектацией), упаковкой (индивидуальной и/или групповой). Именно на этом этапе изделие уже имеет присвоенный индивидуальный серийный номер, так как оно может встать на учет только после пройденной с положительным результатом процедуры выходного контроля. Сразу после упаковки и перемещения на склад необходимо внести дан-

ные в систему складского учета о принятии на баланс данной единицы. При этом, в общей системе учета к серийному номеру могут быть привязаны дополнительные данные, привязанные к номеру смены, партии или данным конкретного сборщика, в зависимости от потребностей конкретного производителя.

В целом, идея создания маркировочной базы состоит в её интеграции с бухгалтерскими и складскими цифровыми учётными системами для минимизации риска непредвиденных ошибок учёта при движении продукции, влияния «человеческого фактора». На рис. 5 указана ориентировочная структура перемещения готового продукта от участка технического контроля до процедуры отгрузки с учётом взаимодействия с цифровыми базами данных.

Рассматриваемая схема перемещения готового изделия технически, в том или ином виде, присутствует на каждом предприятии. При присвоении изделию серийного номера, печатается QR-код на специальной наклейке с помощью термопринтера для паспорта и изделия (на изделии QR-код и сопутствующие надписи также могут быть нанесены методом шелкографии или лазерной гравировки, в зависимости от требований КД). Одновременно изделие автоматически вносится в базу данных как имущество на балансе, фиксируется дата и время внесения. Именно на этом этапе, при необходимости, в базу данных может быть добавлена служебная информация о номере партии, смены, индивидуальном номере сборщика в привязке к индивидуальному серийному номеру конкретного изделия.

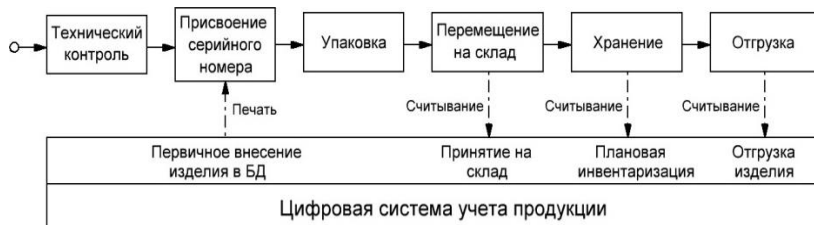


Рис. 5. Структура перемещения готового изделия внутри предприятия

Далее происходит процедура помещения продукта в потребительскую упаковку, наклейка маркировочных табличек на

изделие, паспорт и упаковку, комплектование и перемещение изделия на склад. Работник склада, для фиксации приёма, сканирует каждую единицу продукции с помощью считывателя штрих-кода, подключенного к базе данных через программное обеспечение учёта. Таким образом, осуществляется первоначальный учёт движения продукта. Практически же, данная процедура представляет собой считывание QR-кода с соответствующей маркировочной наклейки на индивидуальной упаковке.

При плановой инвентаризации или пересчёте количества хранимой продукции также производится сканирование изделий, при этом вполне допустимо считывание уже групповой упаковки, при условии её целостности.

Отгрузка со склада производится той же операцией считывания QR-кодов продукции групповой или индивидуальной наклеек. В случае дальнейшей работы с рекламациями, гарантийными случаями или иными прецедентами, по данным QR-кода конкретного изделия удобно вычисляется любая заложенная служебная информация – от варианта исполнения до даты отгрузки, что делает проработку подобных случаев намного проще и информативнее. Разумеется, вполне допустимо добавление в QR-код дополнительных служебных отметок для внутреннего использования (например номер партии или сборщика) на этапе внедрения данной технологии.

Выводы

Таким образом, используя описываемую систему присвоения серийных номеров и маркировки готовых изделий, можно построить чёткую, структурированную систему учёта. Интеграция с системами 1С, Фрегат и прочими, вполне может быть произведена с помощью написания дополнительного программного модуля для обработки QR-кода по требуемому алгоритму. При дальнейшем расширении производства система также пригодна. Основное оборудование, необходимое для организации – термопринтер для наклеек, сканер штрих-кодов, компьютерные терминалы. Похожие, но гораздо более сложные программно-аппаратные комплексы уже работают в системах маркировки «Честный знак» для бытовой продукции с использованием международного стандарта SGTIN.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 2.201-202X. Единая система конструкторской документации. Обозначение изделий и конструкторских документов.
2. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.Д. Крылова – М.: Изд-во Юнити-Дана, 2001. – 711 с.
3. Ассоциация автоматической идентификации GS1: [Электронный ресурс]. URL: www.gs1ru.org. (Дата обращения: 10.08.2023).
4. Код классификатора ЕСКД:647611: [Электронный ресурс] // Класс информ.ру. Справочник кодов общероссийских классификаторов. URL: <https://classinform.ru/ok-eskd/kod-647611.html>. (Дата обращения: 10.08.2023).

Автор

Четвериков Станислав Валерьевич, см. стр. 279.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ, ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ, МЕТОДОМ НЕЗАВИСИМОГО ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ ЗАДАЧ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Качелаев О.В., Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

***Аннотация.** Предложен метод контроля знаний, построена модель системы поддержки принятия решения для определения степени соответствия уровня компетентности и прогнозирования успешности субъектов. Выделены основные компоненты компетентности студентов инженерно-технического профиля. Дан анализ применения тестовых технологий при решении задач развития профессионализма и оценки компетентности. Выявлены особенности педагогического тестирования, с учетом которых разработаны алгоритмы и программы оценки качества тестовых заданий.*

***Ключевые слова:** тестирование, метод контроля знаний, модель оценивания успехов, текущий, рубежный, итоговый контроль.*

Введение и постановка задачи

Дистанционное образование и развитие информационных технологий неразделимы: одно способствует развитию другого. И сейчас уже студент, где бы он ни жил, может учиться по про-

грамме практически любого университета. Образование становится общемировым и общедоступным, опережая процессы политического и экономического объединения. В университете ведутся различные разработки и совершенствование образовательных программ. Образовательная программа это некоторый объем знаний, после изучения которой студент запускает проверку – тесты.

Развитие компетентности студента становится одной из основных задач любого учебного заведения. В современной образовательной практике понятие компетентности представляется в качестве «узлового», а компетентностный подход является одним из оснований обновления образования [1]. Понятие компетентность:

- объединяет в себе интеллектуальную и навыковую составляющую образования;
- включает идеологию интерпретации содержания образования, формируемого «от результата» («стандарт на выходе»);
- включает в себя ряд однородных умений и знаний, относящихся к профессиональной, информационной, правовой и другим сферам деятельности.

Большинство работ, посвященных проблеме компетентностного подхода в образовании [1], направлено на решение задач обновления содержания учебного процесса (учебных планов, рабочих программ и т.д.), при этом проблема оценки уровня компетентности студентов должным образом не стандартизована, что является очень важным при количественном определении уровня обладания студентом требуемыми компетентностями. В связи с вышеизложенным, тема работы, направленная на изучение и решение проблем оценки компетентности студентов, является актуальной и представляет теоретический и практический интерес. Целью работы является:

1. разработка алгоритмов и информационных технологий измерения компонентов и элементов компетентности;
2. разработка интегральных показателей и критериев оценки компетентности на основе результатов тестирования и экспертного оценивания;

3. разработка системы поддержки принятия решения для определения степени соответствия уровня компетентности и прогнозирования успешности субъектов;

Уровень предоставляемых ВУЗом образовательных услуг проверяется аттестацией [1]. Целью аттестации является установление соответствия данной программы ВУЗа требованиям государственного образовательного стандарта. Задачами аттестации являются:

- получение объективной информации о состоянии учебного процесса;
- установление степени соответствия фактического содержания ООП и качества подготовки выпускников требованиям ГОС.

Тестовый контроль

Наиболее доступный метод отслеживания тенденций в изменениях контроля уровня знаний и качества образования – метод анкетирования. Тестовый контроль позволяет измерять уровень знаний с большой адекватностью и минимальными затратами труда и времени [2, 3]. Разработка тестов относится к области высоких научных технологий и представляет собой последовательную реализацию следующих этапов: -создание тестов ***текущего, рубежного, и итогового*** контроля [2]. Нами в курсе «Электротехника», используется метод с независимым предъявлением задач (НПЗ) [2] который определяет механизм генерирования тестовых заданий (ТЗ), а также критерии принятия решений, связанных с оцениванием уровня знаний, по результатам выполненных заданий. Алгоритм метода [3] включает в себя следующие этапы:

- установка количества тестовых заданий, времени контроля, уровня сложности задач, ограничение на использование информационной помощи, критериев оценивания;
- формирования множества ТЗ, и генерирование их случайным образом, из числа тех которые еще не выполнялись;
- обеспечение по уровневому диалога при выполнении ТЗ обучаемым;
- анализ ответов и запись информации в протокол;

Секция 6

- проверка условий завершения контроля, если выполнены то переход на следующий этап;
- определение интегральных результатов контроля, предъявление их обучаемому и запись их в протокол. Если при этом учитывается сложность задач, то к интегральным результатам относится рейтинг:

$$R = \sum r_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, n$,

показатель успешности выполнения тестового задания:

$$q = R / \sum h_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Оценивание может производиться по интегральным результатам или с учетом их распределения по темам, получится дифференциальная оценка в отношении n_r / n , или показатель успешности q . В данном методе на порядок предъявления ТЗ влияют результаты их выполнения. Приведем критерии успешного выполнения контрольного задания на основе результатов, детализированных по тематическим областям [2]:

1. Без учета сложности и с фиксированным числом ТЗ. Оценивается – минимальная доля правильно выполненных ТЗ, необходимая для получения зачёта – d_r^T :

$$n_t / n \geq d_r^T,$$

где n_t – количество ТЗ, с превышением времени

Максимально допустимая для получения зачёта доля ошибок, отказов от ответа и превышении лимита времени по ТЗ – d_e^T :

$$(n_e + n_d + n_t) / n \leq d_e^T,$$

где n_e – ТЗ с ошибками; n_d – количество отказов.

Максимально допустимая для зачета доля абсурдных ответов – d_a^T

$$n_a / n \leq d_a^T.$$

Минимальная доля правильно выполненных ТЗ по одной тематической области, необходимая для получения зачета – d_r^{TO} :

$$\left(d_r^{TO} \leq d_r^T\right),$$

$$\forall i \left(n_{ri} / n_i\right) \geq d_r^{TO},$$

где n_{ri} – количество правильно выполненных ТЗ по i -й тематической области; n_i – количество предложенных ТЗ по i -й тематической области.

Максимально допустимая для получения зачета доля ошибок, отказов от ответа и превышения лимита времени по ТЗ, относящимся к одной тематической области – $d_e^{TO} \cdot (d_e^{TO} \geq d_e^T)$:

$$(n_{ei} + n_{di} + n_{ii}) / n_i \leq d_e^{TO}.$$

Максимально допустимая для получения зачета доля абсурдных ответов по одной тематической области – d_a^{TO} . В общем случае – $(d_a^{TO} \geq d_a^T)$:

$$n_{ai} / n_i \leq d_a^{TO},$$

где n_{ai} – количество абсурдных ответов.

Предложены алгоритмы обработки и анализа результатов экспертного оценивания и построения формализованных критериев для решения задач оценки компонентов компетентности, позволяющие эффективно решать задачи, связанные с оценкой компетентности студентов. Разработаны алгоритмы и программы оценки качества тестовых заданий на основе моделей [4-5], продемонстрирована эффективность предложенного подхода на реальных данных (решения задачи оценки остаточных знаний у студентов Таганрогского технологического института. Выявлены особенности представления результатов психологического тестирования в зависимости от вида теста (формализованные и неформализованные методики). Определены и программно реализованы (рисунок) психодиагностические методы и методики измерения компонентов и элементов компетентности.

Выводы

1. Определена актуальность проблемы формирования компетенций специалиста как основной цели инженерного образования.

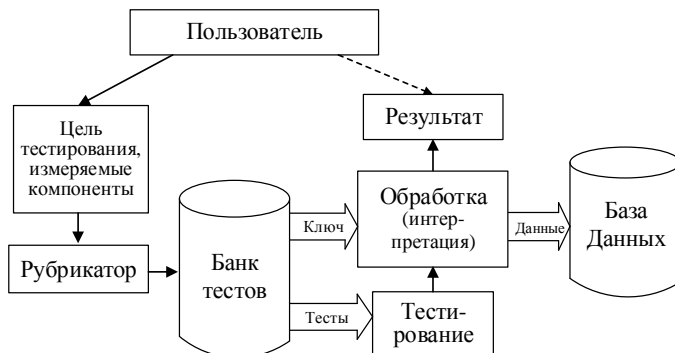


Схема компьютерного психологического тестирования для определения компонентов и элементов компетентности

2. Выделены основные компоненты компетентности студентов инженерно-технического профиля, сформирован набор показателей для каждого из компонентов.

3. Дан анализ применения тестовых технологий при решении задач развития профессионализма и оценки компетентности. Основным достоинством программного обеспечения является возможность расчета функции успеха, что позволяет проводить параметризацию педагогического теста и оценивать его эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем. – М: Информ. – Издат. дом «Филинь» 2003. 616 с.

2. Рассоха Д.П., Полуянович Н.К. Программа поуровневого генерирования заданий контроля знаний, с элементами экспертной системы (ПГЗЭС). ОБ Программы для ЭВМ БД ТИМ №4 2004г., по св-ву № 2004612142.

3. Полуянович Н.К. Генерирование заданий и критерии принятий решений в методе контроля знаний с независимым предъявлением задач. Известия ТРТУ. 2004. № 3 (38). С. 254–262.

4. Полуянович Н.К., Рассоха Д.П., Бурьков Д.В., Полуянович И.А. Технология применения дидактических и методических средств в электротехническом образовании. В сборнике: Педагогическое образование в условиях трансформационных процессов: методология, тео-

рия, практика. материалы III Международной научно-практической конференции. БГПУ имени Максима Танка. 2007. С. 124–125.

5. Полуянович Н.К., Пирский А.В. Применение компьютерных технологий в задачах автоматизации синтеза электрических цепей. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2003. № 3. С. 76-80.

Авторы:

Полуянович Николай Константинович, см. стр. 22.

Дубяго Марина Николаевна, см. стр. 22.

Качелаев Олег Вадимович, см. стр. 390.

РАЗРАБОТКА SCADA СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАКЕ

Архипова М.А., Васильева Л.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены принципы построения SCADA-системы для регулирования уровня жидкости в баке с использованием пакета ScrEditor.

Ключевые слова: инструментальный интерфейс, SCADA система, автоматизированная система управления.

Регулирование уровня жидкости с использование автоматизированных систем является одной из основных задач промышленных предприятий и на данный момент представляет собой один из наиболее эффективных принципов автоматике при частичной автоматизации производства.

Регулирование уровня жидкости в баке является частью системы автоматического управления (САУ), поэтому данную САУ можно реализовать в системе SCADA [1]. С помощью программного пакета SCADA разрабатываются и поддерживаются функционирование систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте в реальном режиме времени [2].

Создание проекта «Регулирование уровня жидкости в баке» осуществляется с помощью специального программного обеспечения (ПО) – пакета ScrEditor. Данное ПО позволяет в последующем перенести проект на панель DELTA оператора серии

DOP модели DOP-AE57CSTD. С помощью программируемых графических терминалов DOP-AE можно визуализировать информацию, поступающую от микропроцессорных устройств и устройств управления производственными и технологическими процессами [3]. Интерфейс проекта «Регулирование уровня жидкости в баке» представлен на рис. 1.

В случае, когда поступает жидкость при нажатии кнопки 1, бак может наполняться до уровня 100. В момент достижения жидкости уровня 100, переключатель 1 автоматически выключается. Чтобы обеспечить слив жидкости с резервуара необходимо нажать кнопку 2, после чего содержимое в баке со временем будет уменьшаться.

Для оперативного отлаживания и устранения неполадок оператору технологического процесса необходимо предоставить удобный человекo-машинный интерфейс (HMI).

На главном экране (рис. 1) представлены все элементы для реализации проекта: кнопка Button→Maintained; столбчатая диаграмма Bar; трубопровод Pipe; Display: Numeric, Time и Data; индикатор Multistate; шкала Scale.

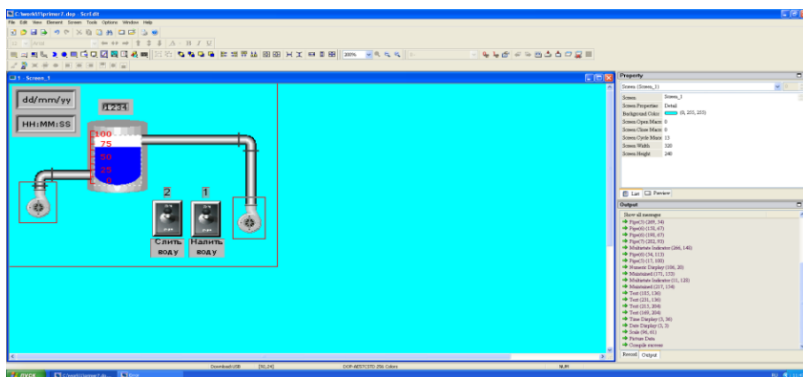


Рис. 1. Регулирование уровня жидкости в баке

На рис. 2 можно увидеть дополнительные окна, где левое окно программы Property – окно свойств, которое позволяет редактировать свойства выбранного элемента, а Output – выходное окно, которое отображает все действия и выходные сообщения

Секция 6

при компиляции ошибки, все действия будут отображаться в этом окне.

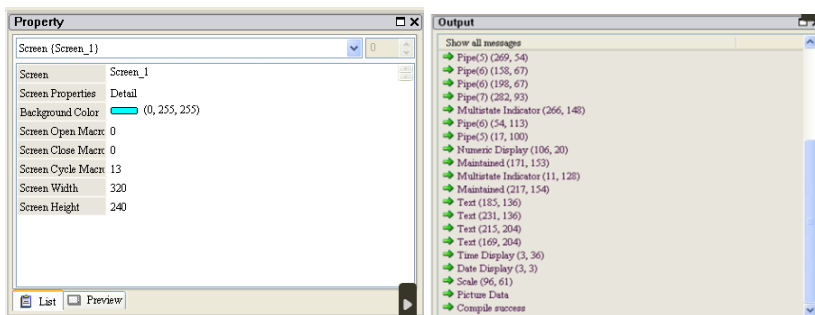


Рис. 2. Окно свойств и выходное окно

Для обеспечения подачи жидкости в бак и слива содержимого с него, необходимо установить насос (индикатор Multistate) – рис. 3.

Регулирование уровня жидкости в баке осуществляется с помощью шкалы Scale и Display Numeric (рис. 4).

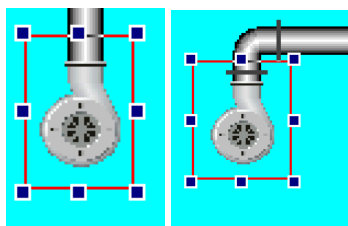


Рис. 3. Установка насоса с помощью индикатора Multistate

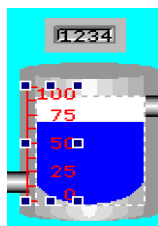


Рис. 4. Элементы регулирования уровня жидкости

С помощью редактора макросов можно создавать и редактировать макропрограммы, выполняемые в HMI, на языке подобном по синтаксису языку BASIC.

Верхний уровень АСУТП - персональный компьютер, связанный через USB-интерфейс с панелью оператора серии DOP модели DOP-AE57CSTD. После создания макроса и запуска программы проект будет перенесен на панель и все действия будут производиться в режиме реального времени (рис. 5).

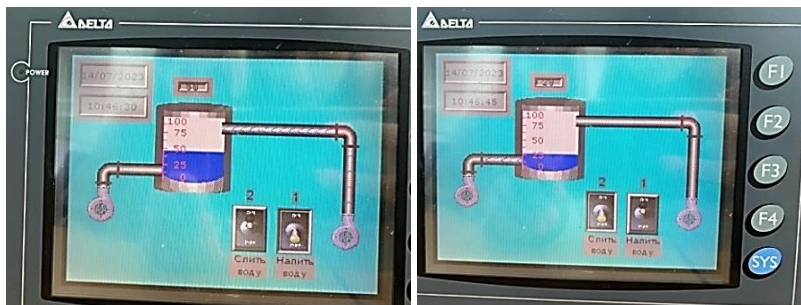


Рис. 5. Проект на панели DELTA оператора серии DOP модели DOP-AE57CST

Выводы

Данная САУ может применяться на промышленных предприятиях. Для решения поставленной задачи, с целью дальнейшей эффективной работы системы необходимо выбрать элементную базу и разработать структуру SCADA системы, а также разработать алгоритм работы программы и реализовать удобный человеко-машинный интерфейс для оператора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охоткин Г.П., Храмов Л.Д., Васильева Л.Н., Чумаров С.Г. Разработка имитационной модели смешительной установки на Labview // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2023. №1 (57). С. 54-63.

2. Генин В.С., Васильева Л.Н., Шарафутдинов Н.Р., Артыкаева Э.М. Использование SCADA-системы Trace Mode для контроля СКН по ваттметрограмме. // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары: 2021. С. 252-262.

3. Панели оператора серии DOP. Руководство по программированию. // URL: https://ftp.totalkip.ru/report.local/manual/Delta_manual_3517.pdf (дата обращения: 09.11.2023).

Авторы:

Архипова Марина Андреевна, студент 4 курса факультета радиоэлектроники и автоматики. E-mail: angelo4ekm.2003@gmail.com.

Васильева Лидия Николаевна, см. стр. 219.

60 ЛЕТ В ПОСТОЯННОМ ПОИСКЕ НОВОГО

Софронов Ю.В., Иванова С.П., Петров В.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация:** Рассмотрены история становления и развития кафедры, организация учебного процесса и научных исследований. Отражено взаимодействие кафедры с производственными и научными коллективами.*

***Ключевые слова:** кафедра, электрические аппараты, история, учебный процесс, научная работа.*

Конец 50-х, начало 60-х годов после организации совнархозов ознаменовался интенсивным ростом промышленного производства в регионах Советского государства, в т.ч. и в Чувашской Республике. Наряду с известными предприятиями – Чебоксарским электроаппаратным заводом (ЧЭАЗ), заводом имени Чапаева и др. возникают новые: «Электроприбор», «Электроавтомат», «ЗЭИМ», «ЗЭИП», «Чувашкабель», «ХБ Комбинат», «Чулочнокотажная фабрика», «Текстильмаш», «Агрегатный завод», «Химпром» и многие др. Это привело к росту потребности в кадрах. Поэтому вполне логичным явилось открытие в 1961 году Волжского филиала Московского энергетического института (ВФ МЭИ), на базе которого в 1967 году был создан Чувашский государственный университет (ЧГУ). Специальность «Электрические машины и аппараты» была открыта с момента создания ВФ МЭИ, а кафедра «Электрические аппараты» образовалась только 25 ноября 1963 года. В приказе № 772 от 25 ноября 1963 года по ВФ МЭИ, подписанном проректором МЭИ по Волжскому филиалу профессором Федоровым А.А., говорится: «Учитывая предполагаемый ежегодный выпуск инженеров-электромехаников по электроаппаратостроению в количестве примерно 75 человек и связанную с этим необходимость иметь специальную выпускающую – профилирующую кафедру ПРИКАЗЫВАЮ:



1. Выделить из состава кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» кафедру «Электрические аппараты».

2. Утвердить преподавательский состав кафедры «Электрические аппараты» согласно приложению 1.

3. Закрепить за кафедрой «Электрические аппараты» помещения согласно приложению 2».

В разные годы кафедрой руководили талантливые организаторы и педагоги: к.т.н., доцент М.Г. Кобленц. (1963-1968), канд. техн. наук, доцент Ю.В. Софронов (1968-1971, 1981-1986, 1992-1993), канд. техн. наук, доцент В.А. Борисов (1971-1981), д-р техн. наук, профессор Э.М. Шнеерсон (1986-1992), канд. техн. наук, доцент Е.Г. Егоров (1993-2022), канд. техн. наук А.В. Михайлов (2022 - настоящее время).

Первыми преподавателями по специальным дисциплинам были инженеры ЧЭАЗ Кобленц М.Г., Смольников В.В., Михайлов Ю.Б., Вундер Я.Ю., молодые выпускники МЭИ Стеценко А.А., Софронов Ю.В., Трепаков С.В., Усманов Ш.Х., Кариков В.М., Никандрова М.М.

В дальнейшем преподавательский состав кафедры пополнился в основном своими выпускниками: В.М. Максимов, К.Т. Детков, В.И. Костылев, А.И. Петухов, В.Г. Степанов, Ю.М. Зайцев, Н.Н. Николаев, В.А. Костерин, Г.П. Свинцов, В.Г. Григорьев, Н.В. Руссова, С.П. Иванова, В.К. Кадыков, В.И. Князев, И.К. Никифоров, П.Г. Гаврилов, многие из которых защитили диссертации, стали доцентами и профессорами. Богатый производственный опыт привнесли в учебный процесс бывшие сотрудники ВНИИР В.А. Борисов, Ф.И. Волинцев, Н.А. Яриз, В.Г. Гришанов, Э.М. Шнеерсон, А.А. Никитин, В.С. Фурашов, Е.Г. Егоров, Л.Ф. Борисов, В.С. Генин, В.Е. Мандравин, Г.С. Коротков, В.Г. Поляков. Все это позволило вести подготовку специалистов, сохраняя богатые традиции МЭИ, развивая собственные и используя опыт, накопленный на производстве.

При технической помощи ЧЭАЗ, методической и научной помощи кафедры электроаппаратостроения МЭИ были созданы необходимые условия для обеспечения полноценного учебного процесса.

Кафедра электрических аппаратов университета довольно быстро достигла уровня лучших электроаппаратных кафедр страны. Этому способствовали установленные с момента ее основания тесные связи учебного процесса с нуждами производства. Преподавательский состав чутко улавливал потребности промышленности и отраслевой науки.

Во-первых. Многие предприятия и организации г. Чебоксары занимались разработкой и производством устройств релейной защиты различных энергетических объектов и энергосистем, в т.ч. в те же годы и сейчас ЧЭАЗ и ЧЭТ-НИИ (Чувашский электротехнический научно-исследовательский институт, ныне ВНИИР). Базовой специальностью для этих целей является «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Открытие ее в Волжском филиале МЭИ по неясным причинам не предполагалось. Поэтому кафедра электрических аппаратов филиала практически с момента ее открытия включила в учебные планы *дисциплину «Аппараты релейной защиты»*. Ни в одной из родственных кафедр СССР эта дисциплина не изучалась. Были предусмотрены лекции, лабораторные занятия, курсовое и дипломное проектирование, создана учебная лаборатория АРЗ, которая в свое время была признана лучшей лабораторией технического профиля ЧГУ. Первым лектором по этой дисциплине был известный специалист по релейной защите, главный инженер ЧЭАЗ Гринштейн В.И. В дальнейшем ее преподавали доценты Борисов В.А., Волынцев Ф.И., Гришанов В.Г., Яриз Н.А., Фурашов В.С., Никитин А.А., профессор Шнеерсон Э.М. По инициативе профессора Ю.Я. Лямеца специальность «Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем» наконец-то в 1995 году открывается в ЧГУ, а в 2009 году кафедра теоретических основ электротехники университета переименована в кафедру теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики (ТОЭ и РЗА).

Во-вторых. По предложению кафедры в официальный перечень специализаций специальности внесена *специализация «Технология электрических аппаратов»*. Кафедра одной из первых среди родственных кафедр вузов страны начала подготовку (1974 г.) инженеров по этой специализации. С этой целью в учебные планы были включены и освоены новые дисциплины

«Технология производства электрических аппаратов», «Автоматизация технологических процессов», «Специальная технология производства электрических аппаратов» и др. Типовые учебные программы по этим дисциплинам министерство поручило кафедре электрических аппаратов университета. Были созданы соответствующие лаборатории, подготовлены и выпущены учебные и методические пособия, которые использовались и другими вузами.

В-третьих. Потребность в изучении сложного технологического оборудования привела к необходимости непосредственного включения в учебный процесс производственной базы. С этой целью кафедра первой в университете (1981 г.) открыла *филиал кафедры на производстве во Всесоюзном научно-исследовательском институте релестроения (ВНИИР)*. В учебный процесс были задействованы лаборатории, отделы и опытный завод института с привлечением его квалифицированных кадров. Филиалом кафедры руководили бывший директор ВНИИР канд. техн. наук, доцент Коротков Г.С. и член Совета директоров ОАО ВНИИР Мандравин В.Е.

В-четверых. На нужды производства были сориентированы и научные исследования кафедры, открыта первая в университете *отраслевая научно-исследовательская лаборатория ОНИЛТ – лаборатория технологии электрических аппаратов*, в которой под руководством доцента Борисова В.А. выполнен ряд работ по разработке автоматизированных средств технологического контроля электрических аппаратов с внедрением в производство. Качество проводимых работ можно проиллюстрировать, например, тем, что разработанное сотрудником лаборатории Григорьевым В.Г. (ныне канд. техн. наук, доцент) «Устройство для проверки транзисторных защит УПТЗ-1» демонстрировалось на ВДНХ СССР и было удостоено бронзовой медали. В дальнейшем В.Г. Григорьев защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Методы и средства технического диагностирования полупроводниковых устройств релейной защиты 6-10 кВ». Обязательным условием для научных исследований являлось участие в них студентов старших курсов.

В-пятых. В те же годы кафедрой был внедрен *учебный план ускоренной подготовки* по системе вечернего образования для выпускников техникумов по родственным специальностям. Для них был установлен срок обучения 4,5 года вместо шести. По этой системе выпуск инженеров- электромехаников осуществлялся шесть лет (1991-1996).

В-шестых. В связи с бурным развитием аппаратуры с использованием электронных и микропроцессорных устройств, а также вычислительной техники, кафедра по инициативе профессора Шнеерсона Э.М. кардинально перестроила учебный план, создала новые лаборатории, осуществила компьютеризацию учебного процесса с первого по выпускной курсы. С этой целью была модернизирована лаборатория систем автоматизированного проектирования (САПР) электрических аппаратов. По инициативе кафедры в официальный перечень специальности введена специализация *«Электронные и микропроцессорные электрические аппараты»*. С 1994 года кафедра получила новое название – *кафедра электрических и электронных аппаратов (ЭиЭА)*.

Преподавателями кафедры разработано методическое обеспечение новых дисциплин *«Элементы электронных электрических аппаратов»*, *«Основы микропроцессорной техники»*, *«Моделирование в электроаппаратостроении»*, *«Электронные и микропроцессорные электрические аппараты»* и др.

В-седьмых. Для дальнейшего развития связи учебного процесса с производством введена в рамках учебного плана *стажировка студентов старших курсов на оплачиваемых инженерных должностях* во ВНИИР и ЧЭАЗ с последующим переходом в дипломное проектирование.

В-восьмых. Новое направление подкреплено и активными научными исследованиями. Под руководством профессора Шнеерсона Э.М. выполнен ряд работ в области использования микропроцессоров в аппаратуре автоматики и релейной защиты, при кафедре *открыта аспирантура*. Был дан новый импульс исследованиям, проводимым в отраслевой лаборатории, начаты разработки и производство испытательного оборудования для релейной защиты и автоматики, известного в настоящее время под *маркой «РЕТОМ»*. Коллектив лаборатории и ее материальная база стала основой для создания *научно-производственного*

предприятия НПП «Динамика», которое сейчас является лидером в России по разработке, производству и продаже современных испытательных установок для проверки различного электрооборудования в электроэнергетике и других отраслях.

В-девятых. После перехода экономики России на рыночные рельсы существенно изменилась структура производства. Многие предприятия были вынуждены перейти на изготовление товаров для народа, в т.ч. и изделий бытовой электротехники, которые являются достаточно сложными, использующими современные достижения в области электротехники, электромеханики, электротехнологии, электронной, микропроцессорной и компьютерной техники. Их разработка, обслуживание и производство являются наукоемкими и требуют высококвалифицированных кадров.

Поэтому по инициативе кафедры электрических и электронных аппаратов университета в официальный список специализаций специальности включена *специализация «Бытовая электротехника и технический дизайн»*. Для проведения занятий в штат кафедры приняты опытные специалисты с художественным и дизайнерским образованием Коваленко Ю.В и Кириллов В.М., привлекались к учебному процессу члены Союза дизайнеров ЧР Юрьев Э.М., Сизов В.Ю., канд. пед. наук, доцент Баранов А.А.

Для обеспечения учебного процесса разработан учебный план, приобретены бытовые электроприборы, оборудование, наглядные пособия. Большую, в т.ч. и безвозмездную, помощь оказали предприятия республики, Чебоксарское художественное училище, Союз дизайнеров ЧР. Созданы кабинеты графики и технического дизайна, основ технического дизайна и художественно-технического конструирования, конструкторско-художественная мастерская. Оборудована специализированная лаборатория бытовой техники для проведения занятий по специальным дисциплинам. Курсовые и дипломные проекты предусматривали параллельную техническую и дизайнерскую проработку изделий бытовой электротехники. В 1999 г. осуществлен первый выпуск инженеров-электромехаников, получивших не только хорошие технические знания, но и подготовку в области промышленного дизайна.

В-десятих. Кафедра в 2005 году признавалась *лучшей* в университете по организации студенческих научно-исследовательских работ. По итогам 2007 года кафедра ЭиЭА названа лучшей среди кафедр технического профиля университета.

С целью расширения инновационной деятельности в области электротехники и энергетики, повышения эффективности научно-исследовательских разработок, вовлечения в инновационный процесс студентов, магистрантов, аспирантов, инженеров и молодых ученых приказом № 532Общ от 18 ноября 2014 года *создана учебно-научно-исследовательская лаборатория «Исследовательский центр цифровых технологий» (ИЦТТ).*

Среди научных исследований, проведенных в ИЦТТ, следует отметить цикл научных работ по теме «Разработка вакуумного контактора с магнитной памятью с управлением от поляризованной магнитной системы на основе высококоэрцитивных постоянных магнитов». По итогам работы аспирант кафедры Зайцев Н.Ю. старший преподаватель Зайцев Ю.М., канд. техн. наук, старший преподаватель Михайлов А.В., ассистент Сорокин Н.Н., д-р техн. наук, профессор Свинцов Г.П. Указом Главы ЧР №215 от 28 августа 2020 года награждены *Государственной премией Чувашской республики* в области естественных и технических наук за 2019 год.

В 2018-2020 годах кафедра ЭиЭА участвовала в реализации по постановлению правительства РФ № 218 от 09 апреля 2010 года комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему «Разработка нового поколения серии установочных автоматических выключателей на токи до 1000 А для импортозамещения электрооборудования в наукоемких отраслях промышленности и освоение их высокотехнологичного производства» в рамках договора № Др944/17/1858-17 от 27 октября 2017 года с АО «ЧЭАЗ».

В 2022 году канд. техн. наук, старший преподаватель Петров В.Н. признан победителем X конкурса «Лучший молодой ученый Чувашской Республики» в номинации «Лучший молодой ученый-исследователь Чувашской Республики», а старшему преподавателю Зайцеву Ю.М. присвоению почетное звание «Заслуженный изобретатель Чувашской Республики».

Решением Ученого совета ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (протокол № 11 от 07 июля 2017 года) за вклад в развитие образования и науки в Чувашской Республике профессору кафедры Свинцову Г.П. вручен диплом победителя конкурса на почетное звание «Профессор года» по итогам 2016 года.

За вклад в развитие образования и науки в Чувашской Республике 3 октября 2017 года объявлена благодарность главы ЧР Игнатъева М.В. заведующему кафедрой Егорову Е.Г., профессору Свинцову Г.П.

В 2019 году в номинации «Лучшее учебное издание по техническим наукам и математике» VII Приволжского межрегионального конкурса вузовских изданий «Университетская книга-2019» награждены Дипломом лауреата: доцент кафедры Максимов В.М. за учебное пособие «Конструирование слаботочных коммутационных элементов»; канд. техн. наук, доцент Никифоров И.К. за учебное пособие «Радиоэлектронная и силовая электронная аппаратура. Резисторы».

В настоящее время кафедра осуществляет подготовку: бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электрические и электронные аппараты», магистров по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» по направлениям «Общая теория электромеханического преобразования энергии», «Электрические аппараты управления и распределения энергии», аспирантов по специальности 2.4.2 «Электромеханические комплексы и системы».

Кафедра электрических и электронных аппаратов является одной из старейших технических кафедр университета. За 60 лет ее существования для народного хозяйства подготовлено 3417 квалифицированных специалистов с высшим профессиональным образованием, качество которых обеспечено, в частности, и благодаря новациям, рассмотренным в статье.

Авторы:

Софронов Юрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент. В 1964 году окончил электромеханический факультет Московского энергетического института. В 1972 году защитил кандидатскую диссертацию. В 1968-1971, 1981-1986, 1992-1993 годах являлся

заведующим кафедрой электрических аппаратов ЧГУ. Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Иванова Светлана Петровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». В 1994 году окончила электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Научное обоснование ускоренных испытаний магнитных пускателей на коммутационную износостойкость». E-mail: isp1970@mail.ru.

Петров Виктор Николаевич, см. стр. 272.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Малинин Г.В., Лазарева Н.М., Охоткин Г.П., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Арзамасов В.Л., ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Рассматривается имитационная Simulink-модель каскадного многоуровневого инвертора напряжения. Приводятся временные диаграммы и результаты расчета параметров установившегося режима работы преобразователя на трехфазную активно-индуктивную нагрузку, соединенную по схеме «Симметричная звезда».

Ключевые слова: Simulink-моделирование, трехфазный многоуровневый каскадный инвертор, низковольтные ячейки инвертора, симметричная трехфазная RL-нагрузка.

Поверочное моделирование режимов работы устройств силовой электроники перед изготовлением опытного образца позволяет провести качественную и количественную оценку работы преобразователя и выбрать лучший вариант из нескольких возможных [1]. Имитационное моделирование удобно выполнять в приложении Simulink системы Matlab, обеспечивающем высокую точность и достоверность результата.

Имитационная модель трехфазного многоуровневого инвертора напряжения, состоящего из двадцати семи однофазных инверторных ячеек, по $P=9$ последовательно соединенных в каждой фазе, приведена на рис. 1. Данная структура преобразо-

вателя позволяет получить на выходе $2P+1=19$ уровней фазного напряжения U_{xn} , где x - обозначение фаз А, В, С.

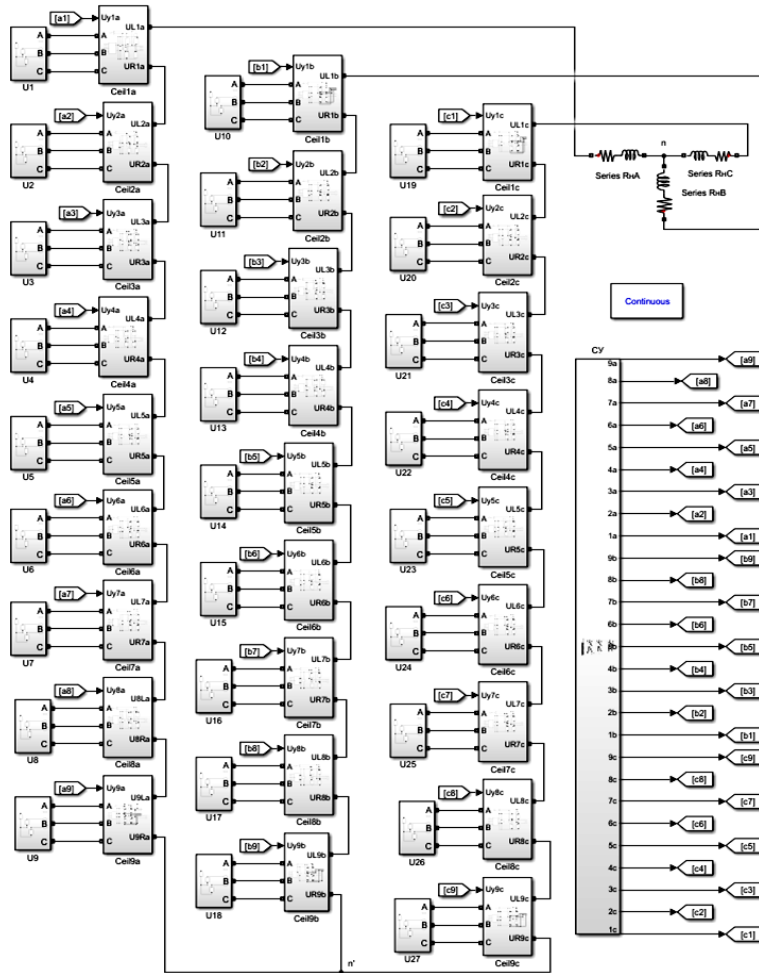


Рис. 1. Simulink-модель силовой части многоуровневого инвертора напряжения, работающего на трехфазную RL-нагрузку

Преобразователь обеспечивает в трехфазной нагрузке суммарную активную мощность 19,4 МВт (КПД = 97%) при питании от трехфазной сети промышленной частоты. Питание пре-

образователя выполняется от фазосдвигающего многообмоточного трансформатора, который в приведенной модели для простоты заменен источниками напряжения $U1-U27$, обеспечивающими необходимый фазовый сдвиг для каждого уровня выходного напряжения.

Каждая ячейка реализована по симметричной мостовой схеме (рис. 2).

Модель инверторной ячейки состоит из блока Universal Bridge трехфазного неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром $C\phi = 20$ мГн на выходе и однофазного инвертора на четырех MOSFET-транзисторах.

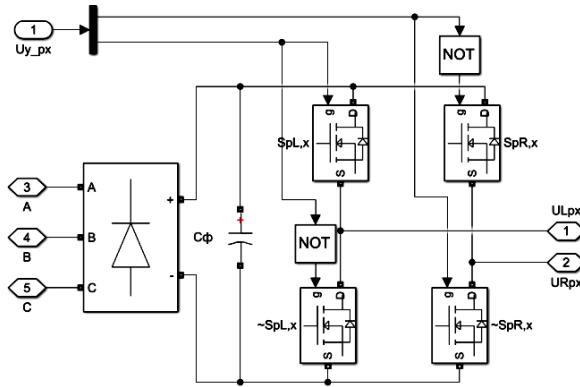


Рис. 2. Модель p -й мостовой инверторной ячейки фазы x

На рис. 2 принято следующее обозначение ключей: $p = \overline{1}, \overline{P}$ - номер ячейки; L, R - левая и правая стойки моста соответственно; $S, \sim S$ - прямой и инверсный ключи стойки.

Сигналы управления U_u силовыми ключами левой и правой стоек моста формируются системой управления СУ (рис. 1).

Для формирования прямоугольных импульсов управления транзисторами используется метод фазового сдвига несущих (Phase Shifted, PS), позволяющий при достаточно простой реализации алгоритма обеспечивать наилучшую форму выходного напряжения и низкий уровень потерь [2]. Для реализации данного метода используются $2P$ высокочастотных двухполярных треугольных задающих сигналов $U_{tr,Lp}$ и $U_{tr,Rp}$, $p = \overline{1}, \overline{P}$ одина-

Секция 6

ковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе относительно друг друга на $180 / P = 20^\circ$. На каждую ячейку подается два инверсных треугольных сигнала несущей частоты $f_{\text{ШИМ}} = 800$ Гц (рис. 3). Несущее треугольное напряжение сравнивается с низкочастотным модулирующим сигналом синусоидальной формы частоты $f_{\text{инв}}$. С целью снижения в выходном напряжении инвертора высокочастотных составляющих сигнал опорного напряжения вычисляется по формуле

$$u_{\text{оп},x} = u_{\text{оп}}^{(1)} + \frac{1}{6}u_{\text{оп}}^{(3)},$$

где $u_{\text{оп}}^{(1)}$ - напряжение первой гармоники частоты $f_{\text{инв}}$ (при моделировании принято $f_{\text{инв}} = 100$ Гц); $u_{\text{оп}}^{(3)}$ - напряжение третьей гармоники.

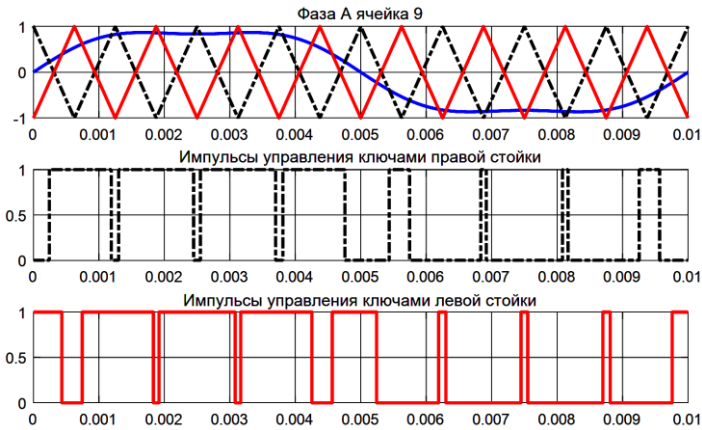


Рис. 3. Формирование импульсов управления ключами одной из инверторных ячеек

Алгоритм выработки сигналов управления затворами следующий [2]:

$$\begin{cases} S_{pLx} = 1, \\ \sim S_{pLx} = 0, \end{cases} \text{ если } u_{\text{оп},x} > u_{\text{тр},Lp},$$

$$\begin{cases} \sim S_{pRx} = 1, \\ S_{pRx} = 0, \end{cases} \text{ если } u_{\text{оп},x} > u_{\text{тр},Rp}.$$

Секция 6

Осциллограммы токов ключей одной из инверторных ячеек приведены на рис. 4. Измерение действующих значений токов показало, что транзисторы нагружены не одинаково: в зависимости от местоположения ячейки разница между максимальным и минимальным значениями тока достигает 7 А.

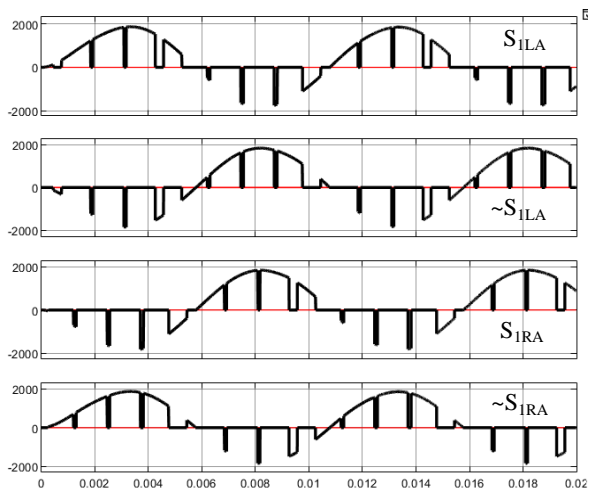


Рис. 4. Токи ключей первой ячейки фазы А

Осциллограммы фазных напряжений и токов нагрузки приведены на рис. 5. При моделировании приняты активная мощность нагрузки $P_{\text{ном}} = 20$ МВт, линейное напряжение на нагрузке $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, напряжение вентильной обмотки $U_2 = 390$ В; сопротивления ключей в проводящем состоянии выбраны исходя из обеспечения в нагрузке мощности $0,97P_{\text{ном}}$.

Спектральный состав напряжения и тока нагрузки фазы А приведен на рис. 6. Амплитуда фазного напряжения гармоники основной частоты $f_{\text{инв}} = 100$ Гц равна 8035 В, 200 и 400 Гц компоненты составляют соответственно 1,2 и 1,9 % от основной. Остальные компоненты имеют амплитуды меньше 0,4 %. Основная гармоника тока фазы составляет 1849 А, вторая и четвертая гармоники – 0,91 % от основной, остальные гармонические составляющие тока имеют амплитуды меньше 0,1 %. Несинусоидальность тока и напряжения в нагрузке составляет 1,3 и 6,74 % соответственно.

Секция 6

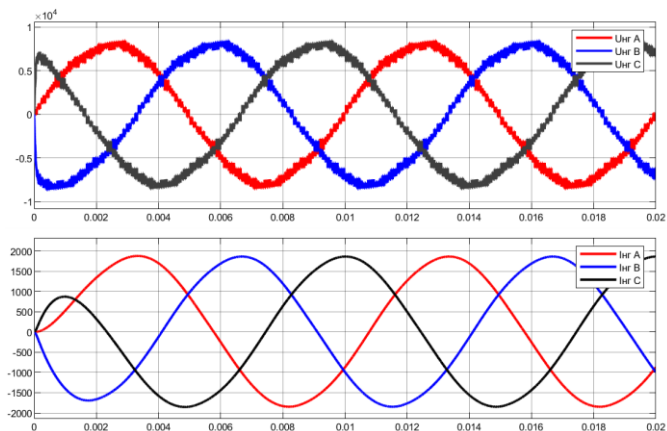


Рис. 5. Фазные напряжения и токи нагрузки

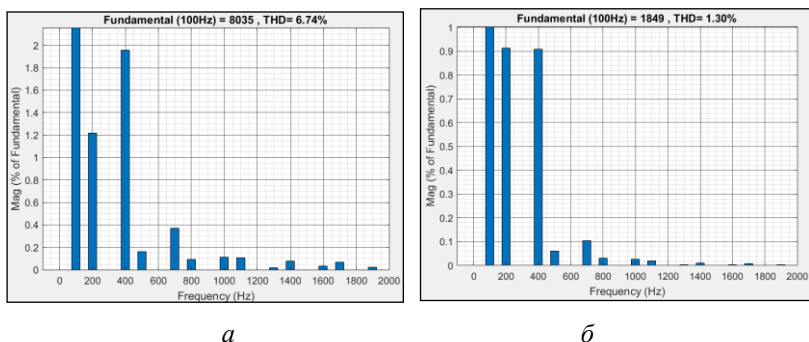


Рис. 6. Спектральный состав напряжения (а) и тока (б) нагрузки фазы А

Выводы

1. Синтезированная имитационная Simulink-модель позволяет исследовать статические и динамические режимы работы многоуровневого каскадного инвертора напряжения.

2. Преобразователь, реализующий рассмотренную модель, позволяет при питании от промышленной сети получить номинальное линейное напряжение в нагрузке, соединенной по схеме «Симметричная звезда», равное 10 кВ, и суммарную активную мощность 20 МВт, обеспечивая КПД = 97%.

3. Увеличивая число низковольтных ячеек инвертора, можно обеспечить требуемое напряжение и мощность в нагрузке без применения дорогих высоковольтных ключей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жемеров Г.Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай, И.Г. Титаренко // Электротехника и электромеханика. 2013. № 2. С. 40-47.

2. Колпаков А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями / А. Колпаков, Е. Карташев // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 57-65.

Авторы:

Малинин Григорий Вячеславович, см. стр. 384.

Лазарева Надежда Михайловна, см. стр. 353.

Охоткин Григорий Петрович, см. стр. 86.

Арзамасов Владислав Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИР». Окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ в 1981 году, получил ученую степень в 2013 году. Диссертацию защитил по теме «Разработка и исследование преобразователей частоты для установок электроназрева нефтескважин». E-mail: viking2999@yandex.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАМИАННОГО МЕТОДА ДЛЯ СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА¹

Аббясов А.М., Тарарыкин С.В., ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Россия

Аннотация. Разработан итерационный метод синтеза робастной системы с полиномиальным регулятором «вход-выход» на основе грамианного подхода. При этом на каждом шаге целенаправленно изменяются сингулярные числа грамианов управляемости и наблюда-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ №075-03-2023-025 (1/23)

Секция 6

емости объекта, после чего синтезируется основной регулятор, обеспечивающий требуемые показатели качества системы при вариациях внутренних параметров.

Ключевые слова: грамианный метод, робастная САУ, транспортирование материала, полиномиальный регулятор «вход-выход».

Системы управления транспортированием длинномерных материалов в процессах их технологической обработки находят широкое применение в составе агрегатов и поточных линий в химической, бумагоделательной, текстильной, металлургической и других отраслях промышленности [1].

Базовыми элементами таких многомашинных систем являются двухканальные системы автоматического управления транспортированием материала – САУ ТМ (рис. 1), объединение которых в единую поточную линию обеспечивает выполнение требуемых технологических функций, возложенных на агрегированное оборудование.

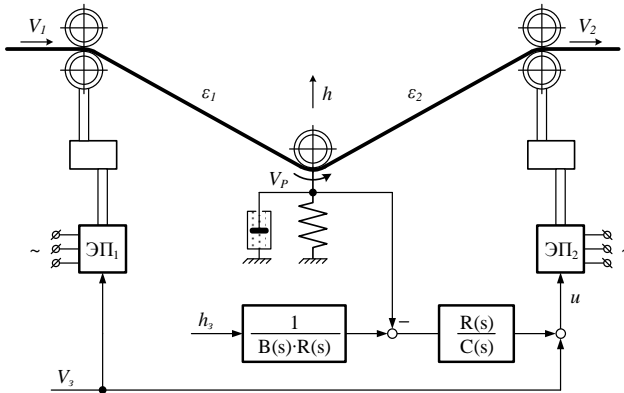


Рис. 1. Функциональная схема двухканальной САУ ТМ

Управляемая синхронизация машин осуществляется формированием и обработкой единого сигнала задания скорости V_3 на оба канала с электроприводами ЭП 1, 2, а также корректирующего сигнала по положению h_3 измерительного ролика, на управляющее устройство ведомого канала.

Для согласованной работы агрегированных машин требуется обеспечить заданное качество управления натяжением ТМ в

условиях исходной неопределенности и возможных вариаций как внутренних параметров объекта, так и управляющего устройства.

Согласно [2] соответствующее векторно-матричное и «вход-выходное» представление объекта с параметрами, характерными для оборудования поточной линии ПЭТФ-2400 по производству пленочных материалов, имеет вид: вектор координат состояния $\mathbf{x} = [V_p \quad h \quad \varepsilon_1 \quad \varepsilon_2]^T$ и матрицы динамики, входа и выхода

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -25 & 25 \\ 0 & -4 & 5 & 5 \\ 1 & 4 & -6 & -5 \\ -0,667 & 2,667 & -2,667 & -4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 11 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

передаточная функция (ПФ) от управляющего воздействия u к выходу h

$$H_o(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{55s^2 + 55s^2 + 2750}{s^4 + 14s^3 + 59s^2 + 519,3s + 66,7}.$$

Объект управления (ОУ) имеет достаточно высокий порядок и сложные взаимосвязи координат состояния, что делает целесообразным управление по состоянию.

Однако трудности измерения полного вектора состояния объекта приводят к необходимости замены регуляторов состояния на динамические регуляторы «входа-выхода», получившие название полиномиальных (ПР) [3].

Традиционно синтез САУ с динамическими ПР проводят методом полиномиального модального управления [3] при номинальных значениях параметров ОУ путем решения уравнения синтеза

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s),$$

где $B(s)$, $A(s)$ и $R(s)$, $C(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ объекта и регулятора, соответственно, $D(s)$ – желаемый характеристический полином ПФ синтезируемой системы, определяющий требуемое качество управления.

Однако при отклонениях параметров ОУ от расчетных при низких уровнях его управляемости и наблюдаемости может происходить существенное ухудшение качества управления и

Секция 6

даже потеря устойчивости системы в реальных условиях ее эксплуатации.

Так при $D(s) = (s+15)^7$ решением уравнения синтеза были получены следующие полиномы ПР минимального порядка:

$$R(s) = 787,7s^3 + 1,34 \cdot 10^4 s^2 + 4,96 \cdot 10^4 s + 6,48 \cdot 10^4;$$

$$C(s) = s^3 + 91s^2 - 3,98 \cdot 10^4 s - 1,11 \cdot 10^5.$$

Соответствующие переходные характеристики 1, 2 синтезированной САУ при исходных параметрах ОУ и их возможных отклонениях от расчетных значений приведены на рис. 2, а. Они свидетельствуют о высокой чувствительности системы к параметрическим возмущениям и необходимости значительного улучшения ее робастных свойств.

Для этого по аналогии с [4] предлагается использовать итерационный метод синтеза робастных САУ, на каждом шаге которого целенаправленно изменяются сингулярные числа грамианов управляемости или наблюдаемости, формируется предрегулятор, преобразующий структуру расчетной модели объекта в направлении повышения управляемости и наблюдаемости, рассчитываются параметры основного регулятора и выполняется оценка робастных свойств синтезированной системы в заданных интервалах изменения внутренних параметров.

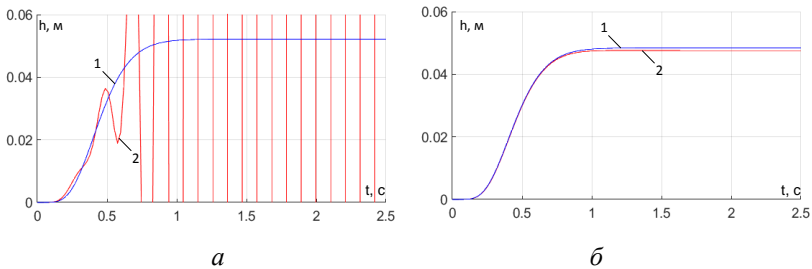


Рис. 2. Переходные характеристики исходной (а) и синтезированной (б) САУ ТМ

Применение разработанного метода в расчетном примере позволило изменить исходную модель ОУ, распределение его нулей и полюсов и сформировать новое управляющее устройство с полиномами ПФ

$$\hat{R}(s) = 6,5s^3 + 144,5s^2 + 1,48 \cdot 10^3 s + 1,03 \cdot 10^4,$$

$$\hat{C}(s) = s^3 + 73,5s^2 + 1,61s + 1,31 \cdot 10^4,$$

обеспечивающее решение поставленной задачи в достижении заданных робастных свойств синтезированной САУ (рис. 2, б).

Выводы

Разработанный грамианный метод синтеза САУ ТМ позволяет осуществить целенаправленное улучшение системных свойств объекта и на основе использования динамического (полиномиального) регулятора «вход-выход» обеспечить робастное управление транспортированием длинномерного упругого материала в составе двухканального агрегата с заданными показателями качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
2. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2006 – 256 с.
3. Крутько П. Д. Полиномиальные уравнения и обратные задачи динамики управляемых систем / П. Д. Крутько // Изв. РАН. Техн. Кибернетика. – 1986. – №1. – С. 125-133.
4. Анисимов А. А., Тарарыкин С. В. Итерационный метод структурно-параметрического синтеза робастных систем с регулятором состояния // Изв. РАН. Т и СУ. 2018. №4. С. 42–55.

Авторы:

Аббясов Алексей Михайлович, аспирант кафедры электроники и микропроцессорных систем, ИГЭУ. Окончил электромеханический факультет, ИГЭУ в 2006 году. E-mail: alexx.bit@mail.ru.

Тарарыкин Сергей Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем ИГЭУ. Окончил электромеханический факультет ИГЭУ в 1978 году. В 1992 году защитил докторскую диссертацию по теме «Принципы управляемой синхронизации машин в технологических агрегатах для производства ленточных и волоконных материалов». E-mail: tarsv56@mail.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА	3
<i>Осокин В.Л.</i> Нечеткая логика в современной электроэнергетике	3
<i>Димитриев А.А., Михеев Г.М.</i> Классификация результатов хроматографического анализа трансформаторного масла на основе экспертной оценки нейронных сетей	10
<i>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.</i> Многоуровневая система управления энергосетью в задачах регулирования пропускной способности.....	16
<i>Гатауллин А.М.</i> Разработка программно-аппаратного комплекса для диагностики состояния силового трансформатора на основе анализа характеристик частичных разрядов	23
<i>Александров В.С.</i> Применение нового подхода к оценке бестрендовых шумовых последовательностей и выбору лучшего тестового устройства в сравнении с эталонным образцом	28
<i>Мицуллин Р.Г., Касимов В.А., Ахметова И.Г., Минкин А.С.</i> Технология контроля состояния воздушных линий электропередачи локационным методом.....	34
<i>Старостина Я.К., Тимофеев Д.Н.</i> Проектирование комплексных систем безопасности.....	42
<i>Минкин А.С.</i> Зависимость механического напряжения провода высоковольтной линии электропередачи от толщины стенки гололедно-изморозевых отложений с различной плотностью	46
<i>Рыжов Э.П., Шалимов А.С.</i> Проверка протоколов резервирования сети SV-подписчика МЭК 61850-9-2 в динамическом режиме.....	51
<i>Пашковский С.Н., Павлов П.С.</i> Способы выполнения защиты от замыкания на землю в компенсированных электрических распределительных сетях.....	55
<i>Андреев В.В., Григорьев Э.А.</i> Обучение перцептрона для обработки сигналов: подготовка микропроцессорной реализации	63
<i>Иванов В.А., Салмин А.Г.</i> Анализ поведения дифференциальной защиты трансформатора при различных способах формирования тормозного тока	69
<i>Бортник Д.В., Орлов А.И.</i> Методы оптимизации модели WaveNet: сравнение байесовского подхода и Hyperband	75

<i>Охоткин Г.П., Портнов М.С., Чертановский А.Г.</i> Дистанционный контроль состояния электроэнергетических объектов на основе технического зрения	81
<i>Кирюшин М.И., Ермаков К.И.</i> Анализ работы волнового ОМП по реальным аварийным осциллограммам	87
<i>Никифоров И.К.</i> Перспективы внедрения мультиагентных сетей в электроэнергетике	91
<i>Гаврилов А.А., Казакова Е.Ю.</i> Особенности разработки алгоритмов тестирования микропроцессорных устройств РЗА с поддержкой протокола МЭК 61850	96
<i>Алифов А.А.</i> Автоколебательная система с нелинейным параметрическим и ограниченным возбуждением	102
<i>Джураев М.М., Рахимов О.С., Каландаров Х.У.</i> Исследование операционных усилителей и устройства на их основе	107
<i>Иванов В.А., Салмин А.Г.</i> Универсальный алгоритм цифрового выравнивания токов плеч для дифференциальной защиты трансформатора	115
<i>Михайлов С.А., Баннов А.Е., Журавлёв И.И.</i> Логическая модель сервера базы данных для SCADA системы в объектах электроэнергетики	122
<i>Синица М.К., Хренников А.Ю.</i> Оценка механизма и скорости старения изоляции силовых трансформаторов согласно уравнению Монтзингера и закону Аррениуса	126
<i>Бабакин А.И., Васильев А.Е., Картузова Т.В.</i> Решение уравнений состояния энергетической сети прямыми методами	131
<i>Пантелеев В.И., Малеев А.В.</i> Метод выделения провода или гололёда в системе оптического мониторинга гололедообразования по технологическим признакам	137
<i>Кузьмин А.А., Ефимов В.В.</i> Особенности процессов цифровой интеграции систем альтернативных источников энергии в общую энергетику	149
<i>Костенко А.А., Курбатова Е.П.</i> Построение и верификация трехмерной модели магнитной системы турбогенератора	157
<i>Маркевич М.В., Андреев В.В.</i> Анализ методов позиционирования поездов на участке железнодорожной линии с применением технологии дистанционного виброакустического зондирования	164

<i>Шихин В.А., Обычайко Д.С., Хрисостому Г.</i> Способ принятия решений по надежной эксплуатации цифровых подстанций на жизненном цикле	171
<i>Ефремов В.А., А.В. Ефремов, Петрушков М.Ю., Смирнов С.Ю.</i> Анализ проектных решений релейной защиты на линиях с возобновляемыми источниками энергии.....	178
<i>Насибуллин А.Т., Акбулатова К.И., Макарова М.С.</i> Актуальность применения адаптивной релейной защиты в сетях промышленных предприятий	189
<i>Петров С.В., Галанина Н.А.</i> Синтез программного обеспечения терминала РЗА на основе его функционального описания.....	193
<i>Кондрашова Ю.Н., Снигур А., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Безбородов М.А.</i> Расчет токов периодической составляющей в начальный момент времени при внезапных нарушениях на промышленном предприятии	198
<i>Кондрашова Ю.Н., Снигур А., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Безбородов М.А.</i> Оценка величины остаточного напряжения в режиме короткого замыкания с учетом коэффициента загрузки по реактивной мощности	202

II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ.....206

<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Туманов Ю.А.</i> Модернизация отопительной котельной в мини-ТЭЦ за счет надстройки котла КВ-ГМ-100 газотурбинной установкой	206
<i>Гусев Н.С., Охоткин Г.П., Васильева Л.Н.</i> Разработка алгоритма и программы схемы управления реверсивным асинхронным электроприводом в среде LOGO! Soft Comfort	214
<i>Абдуллина А.А., Зинуров В.Э.</i> Использование сепарационного устройства с дугообразными элементами в качестве очищающего устройства от шлаков на теплоэнергетических предприятиях.....	219
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Серебрянников А.В., Туманов Ю.А.</i> Повышение эффективности работы отопительной котельной за счет модернизации в мини-ТЭЦ.....	224
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Серебрянников А.В., Туманов Ю.А.</i> Исследование вариантов перевода районной отопительной котельной 4-С г.Чебоксары в режим когенерации.....	232

<i>Лысенко Д.С.</i> Нечёткая модель процессов теплообмена в котле-утилизаторе.....	242
<i>Беляева Е.А., Бузаева А.А., Пазушкина О.В.</i> Дозирование реагента «Аминат КО-2».....	246
<i>Гильмутдинова З.А., Зинуров В.Э.</i> Оценка эффективности устройства с дугообразными элементами для сепарации мелких частиц из газа.....	251
<i>Несмейко А.В., Зинуров В.Э.</i> Внедрение сепарационного устройства с дугообразными элементами в качестве очистительного устройства мелкодисперсных частиц на теплоэнергетических предприятиях	255
III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	259
<i>Зайцев Н.Ю., Зайцев Ю.М., Николаев Н.Н.</i> К методике расчета магнитодвижущей силы срабатывания приводного электромагнита	259
<i>Зайцев Ю.М., Николаев Н.Н., Петров В.Н., Руссова Н.В.</i> Исследование магнитного поля системы токоведущих шин круглого сечения.....	265
<i>Четвериков С.В.</i> Применение интегральных реле совместно с АСУТП.....	273
<i>Сущенко В.С., Швецов Р.С., Ярков Д.А.</i> Возможность снижения стоимости электроэнергии предприятия за счет применения накопителей.....	280
<i>Иванов И.П., Романов В.В., Самуилов Д.В., Михайлов А.В.</i> Особенности конструкции ультратонких интерфейсных электромагнитных реле.....	286
<i>Иванов И.П., Самуилов Д.В., Михайлов А.В.</i> Проектирование магнитных систем ультратонких интерфейсных реле	291
<i>Петрова Р.М., Грачева Е.И.</i> Анализ надежности низковольтных коммутационных аппаратов на примере автоматических выключателей.....	297
<i>Гаврилов А.А., Шалимов А.С.</i> Особенности проверки микропроцессорных устройств РЗА с низковольтными входами.....	303

<i>Васильев Е.Г., Иванов И.П., Филатов А.Е., Михайлов А.В.</i> Сравнительный анализ контактно-дугогасительных систем однополюсных герметичных контакторов постоянного тока	310
<i>Пестряев Д.А., Шалимов А.С.</i> Анализ приёмных антенн GPS/ГЛОНАСС для испытательных систем релейной защиты и автоматики	317
<i>Викторова Т.В., Николаев В.А., Трофимов Е.Ю., Чернов Г.А., Зайцев Ю.М., Петров В.Н.</i> Вопросы проектирования отечественных устройств дистанционного управления автоматическими выключателями до 630 А в условиях импортозамещения	321
<i>Малафеев С.И., Малафеева А.А.</i> Электроснабжение карьерных машин в условиях распределенной генерации	327
<i>Григорьев В.Г., Храмов Л.Д., Борисов Л.Ф.</i> Исследование параметров электрической дуги в низковольтной цепи постоянного тока	334
<i>Гурьев В.К., Котик В.Ю., Руссова Н.В.</i> Электромагниты электрических аппаратов с повышенной энергоэффективностью	341
<i>Романова Е.С., Петров О.А., Руссова Н.В.</i> Реле контроля напряжения	344
IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ	
<i>Лазарева Н.М.</i> Стабилизация тока нагрузки трехуровневого конвертора	348
<i>Жураева К.К.</i> Расчет магнитоупругого преобразователя механической величины в зависимости от свойств магнитопровода	354
<i>Тихомиров А.А., Величко А.А., Скорняков С.М.</i> Экспериментальное исследование электромагнитного излучения при пробое высоковольтного изолятора	359
<i>Федотов А.Ю.</i> Особенности функционирования солнечных электрических станций в составе электрической сети	364
<i>Быковский А.А.</i> Расчёт параметров стенда для исследования однопроводникового резонансного способа передачи электричества	372

<i>Охоткин Г.П., Малинин Г.В., Лазарева Н.М., Селивестров Н.В.</i> Виртуальный прибор для расчета токов, напряжений и емкости входного конденсатора инвертора силового модуля многоуровневого преобразователя частоты	377
<i>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Качелаев О.В.</i> Прогнозные оценки электропотребления в интеллектуальных электрических сетях с учетом режима ее эксплуатации.....	385
<i>Козлова М.В., Румянцев А.С.</i> О применении бивалентных систем теплоснабжения на базе тепловых насосов «воздух-вода» в климатических условиях Российской Федерации	391
<i>Чертановский А.Г., Васильева Л.Н., Портнов М.С.</i> Мультиспектральная камера технического зрения БПЛА.....	395
<i>Миргородская Е.Е., Лобычев А.А., Цвелев В.А.</i> Преобразователь для установок получения энергии от ветрогенераторов	398
<i>Шмигирилов Ю.Г., Дружинская О.И.</i> Особенности тепловых режимов конденсаторов в силовых преобразователях повышенной частоты.....	404
<i>Курбатова Е.П., Кущенко Е.А., Сысоев М.А.</i> Исследования силовых взаимодействий между объемным сверхпроводником и катушкой с током.....	411

**V. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И
КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ**

<i>Михадаров Д.Г., Ильгачёв А.Н., Васильев И.Н.</i> Моделирование распределения тока в жидкой металлической ванне	416
<i>Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Афанасьев В.В., Кузьмин М.Г.</i> Возможности электротермических технологий для газификации твердых углеродосодержащих топлив и отходов	423
<i>Цицонь И.И.</i> Расчет сроков службы изоляции кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации.....	433
<i>Максютов Б.А., Валеев И.М.</i> Повышение эффективности реализации плана организационно-технических мероприятий по снижению потерь электрической энергии в сетях напряжением 10(6)–35 кВ	439
<i>Хисматуллин А.И.</i> Алгоритм автоматизированного расчета параметров схемы замещения эквивалента понижающей подстанции	446

<i>Матюнин А.Н., Васильев И.Н.</i> Исследование трансформатора при околорезонансной работе	450
<i>Петров А.Р., Грачева Е.И.</i> Применение математического моделирования при оценке технических параметров рубильников и предохранителей.....	454
<i>Афанасьев А.Ю., Игнаев С.В., Макаров В.Г.</i> Анализ электромагнитных процессов в синхронных двигателях с реактивным ротором и с повышенной скоростью вращения.....	459
<i>Шалимов А.В., Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М., Снигур А.</i> Влияние вспомогательной степени ответственности производственных механизмов на персонал и анализ последствий отключения	465
<i>Леуткин А.А., Симонов Б.Ф., Кордубайло А.О.</i> Повышение энергоэффективности системы питания и управления электромагнитного молота	471
<i>Александров Н.М., Хренников А.Ю.</i> Обследование механического состояния и диагностика обмоток силовых трансформаторов методом частотного анализа SFRA	477
<i>Шатунов С.Н., Тумаева Е.В.</i> Разработка способа повышения энергоэффективности взаимосвязанных электроприводов с рекуперацией энергии	484
<i>Кузин С.С., Тумаева Е.В.</i> Экономически обоснованный коэффициент мощности автоматизированного электротехнического комплекса типовых производственных механизмов с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств.....	490
<i>Комилова М.Е.</i> Применение системы MATLAB/Simulink для исследования пусковых переходных процессов электропривода	497
<i>Кравченко Г.А., Матюнин А.Н., Васильева Л.А., Андреев В.В.</i> Исследования электроразрядных процессов в Чувашском государственном университете	502
<i>Лавриненко В.А.</i> Тенденции развития тягового электропривода	508
<i>Сидоров С.Н., Старостина Я.К.</i> Малоэлементные преобразователи для ресурсосберегающих асинхронных электроприводов	515
<i>Муртазин Т.Э., Титов В.Г.</i> Система векторного управления автономным электроприводом	523

<i>Осипов Л.Ю., Сорокин С.Е., Батраков И.С.</i> Разработка АСУ для автоматизации систем на примере фрезерного станка	530
<i>Каримов И.Р.</i> Моделирование электропривода переменного тока в MATLAB	534

VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ.....540

<i>Грбчак Е.П., Логинов Е.Л.</i> Управление научно-техническим развитием энергетики России с использованием сервисов искусственного интеллекта.....	540
<i>Четвериков С.В.</i> Обзор системы движения и учёта электротехнических средств на малых сборочных предприятиях	544
<i>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Качелаев О.В.</i> Решение задачи оценки знаний, при подготовке инженерных кадров, методом независимого предъявления задач	551
<i>Архипова М.А., Васильева Л.Н.</i> Разработка SCADA системы автоматического регулирования уровня жидкости в баке	557
<i>Софронов Ю.В., Иванова С.П., Петров В.Н.</i> 60 лет в постоянном поиске нового	561
<i>Малинин Г.В., Лазарева Н.М., Охоткин Г.П., Арзамасов В.Л.</i> Моделирование каскадного многоуровневого инвертора напряжения нового	569
<i>Аббасов А.М., Тарарыкин С.В.</i> Применение грамианного метода для синтеза робастной системы управления транспортированием материала.....	575

Научное издание

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Материалы VII Международной научно-технической
конференции

Публикуется в авторской редакции

Отв. за выпуск В.Г. Ковалев

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 15.12.2023. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 34,17. Уч.-изд. л. 22,17.
Тираж 300 экз. Заказ № 1382.

Отпечатано в соответствии с представленным оригинал-макетом
в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15