

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
V Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2021

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;
В.А. Щедрин, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
Г.А. Кравченко, канд. техн. наук, доцент;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
О.А. Онисова, канд. техн. наук, доцент

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

Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и
П781 энергоэффективности: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. –
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – 424 с.

ISBN 978-5-7677-3385-9

Представлены статьи и доклады пятой 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 978-5-7677-3385-9

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Издательство
Чувашского университета, 2021

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

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ОСЦИЛЛОГРАММ АВАРИЙНОГО ПРОИСШЕСТВИЯ

Кондрашов Н.С., Богданов А.В., Попов Соловьева С.Н.,
СПБПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

***Аннотация.** В рамках данной статьи авторы опишут свои первичные разработки в области сегментации осциллограмм возмущений в электроэнергетических системах. Аварийный процесс может иметь несколько стадий развития, например переход одного вида КЗ в другой, работа АПВ. Следует правильно определить временные границы каждой стадии развития процесса, так они обуславливают различное эталонное поведение системы управления.*

***Ключевые слова:** сегментация, вейвлет преобразование.*

Одной из функций современных устройств релейной защиты и автоматики является запись осциллограмм аварийных событий. В общем случае на таких осциллограммах можно наблюдать несколько участков, каждый из которых соответствует определенному режиму работы сети. Сегментация, то есть определение границ каждого режима на осциллограмме необходимо как для более подробного анализа каждого из них, так и для фиксации времени их наступления.

Одним из основных методов обработки цифровых сигналов является дискретное преобразование Фурье [1, 2]. Его применение в рамках данной задачи будет иметь некоторые ограничения:

1) Для его применения необходимо иметь точное значение частоты сети в данный момент времени.

2) Плавное нарастание действующих значений сигналов, обусловленное тем, что для их расчета будут использоваться значения до- и послеаварийных значений.

3) Нет возможности получить с высокой точностью получить время локализации определенных частот.

В данной работе для решения поставленной задачи будет использоваться непрерывное вейвлет преобразование [3]. В силу формы используемых в нем семейств базисных функций оно лишено описанных выше недостатков преобразования Фурье.

Функции вейвлет преобразования имеет переменную ширину во времени, зависящую от частоты. Вейвлет функции для высокочастотных составляющих сужаются, а для низкочастотных становятся шире. В итоге, ВП позволяет с высокой точностью анализировать как высокочастотные возмущения, имеющие короткую продолжительность, так и длительные низкочастотные колебания.

В данной работе в качестве базисного вейвлета будет использоваться комплексный вейвлет Морле (рис. 1) [4]. Данный выбор обусловлен схожестью формы вейвлета с синусоидой, что позволит с высокой точностью определять локализацию различных частот в сигнале. Данный вейвлет представляет собой комплексную синусоиду с гауссовой огибающей (1)

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} \cdot e^{-\frac{t^2}{B}} \cdot e^{j2\pi Ct} . \quad (1)$$

Параметр B определяет его ширину (большие его значения приводят к повышению спектральной точности, т.е. может быть охвачена большая полоса частот, и уменьшению временной, и наоборот). Также одним из преимуществ, обуславливающих его применение, является гладкость его спектра, что позволяет минимизировать эффект пульсации.



Рис. 1. Комплексный вейвлет Морле

Коэффициенты вейвлет преобразования рассчитываются согласно (2) [5]

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt . \quad (2)$$

Следует отметить, что вейвлет-спектр в отличие от спектра преобразования Фурье является функцией двух аргументов. Параметр a пропорционален периоду сигнала, т.е. обратно зависим с частотой, параметр b характеризует временной сдвиг. То есть графическим представлением результатов расчета будет трехмерная поверхность (для удобства обычно используют ее двухмерную проекцию) в пространстве a, b, W . Где по оси a откладываются частоты, по оси b – время, по оси W – энергия сигнала $W(a,b)$. На рис. 2-3 показан сигнал и его вейвлет скалограмма.

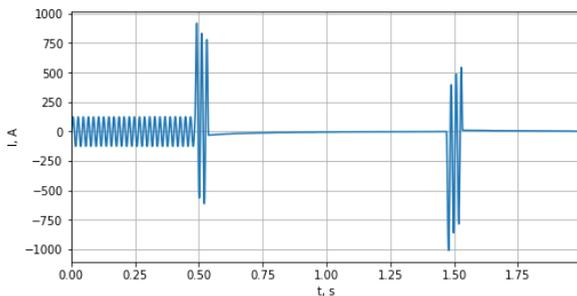


Рис. 2. Осциллограмма фазного тока

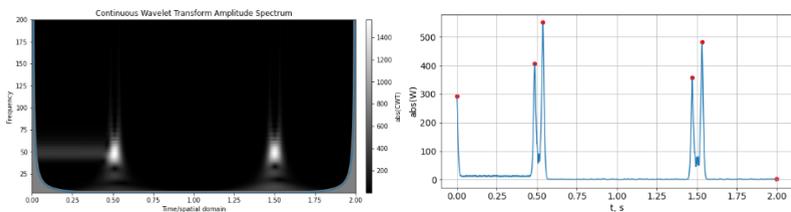


Рис. 3. Вейвлет скалограмма и энергия спектра

По скалограмме видно, что в моменты изменения сигнала возникают выбросы в области, соответствующей высоким частотам. Это явление и было заложено в основу разработанного алгоритма.

Для нахождения моментов изменения исследуемых сигналов, предлагается рассматривать суммарную энергию высокочастотного спектра вейвлет преобразования (от $2f_{пр}$ до $f_{диск}/2$). Локальные максимумы полученной зависимости будут соответствовать моментам изменения сигнала

Для примера рассмотрим результаты расчета действующего значения с использованием преобразования Фурье вблизи первого возмущения (рис. 4). Вертикальной линией показан момент начала повреждения. Границы сегментов при таком подходе следует определять при превышении действующим значением некоторой уставки, рассчитываемой относительно предыдущего режима. Это необходимо для отстройки от различных помех, которые могут быть в сигнале, а также постоянной составляющей. Как видно из данного рисунка процесс нарастания/спадания сигнала происходит довольно медленно (порядка 1 периода промышленной частоты). Следовательно, граница сегмента может быть определена с большой погрешностью.

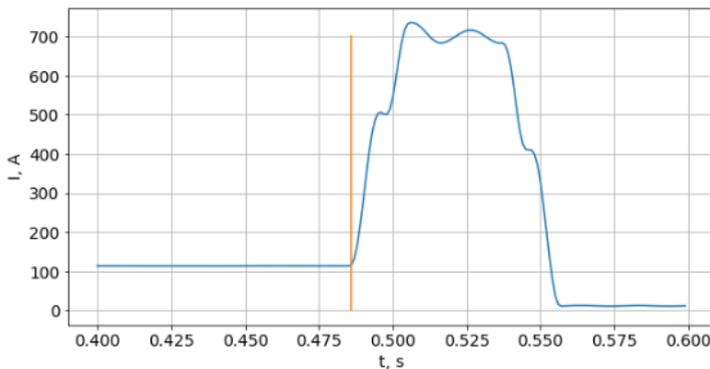


Рис. 4. Действующее значение тока

Для тестирования точности разработанного алгоритма в среде Simulink был смоделирован режим работы сети, показанный на рис. 5. В таблице в столбцах «Реальное значение» приведены временные метки начала и конца для каждого сегмента, определенные в процессе моделирования, в столбцах «Расчетное значение» записаны результаты, полученные в ходе автоматизированной сегментации осциллограммы разработанным алгоритмом.

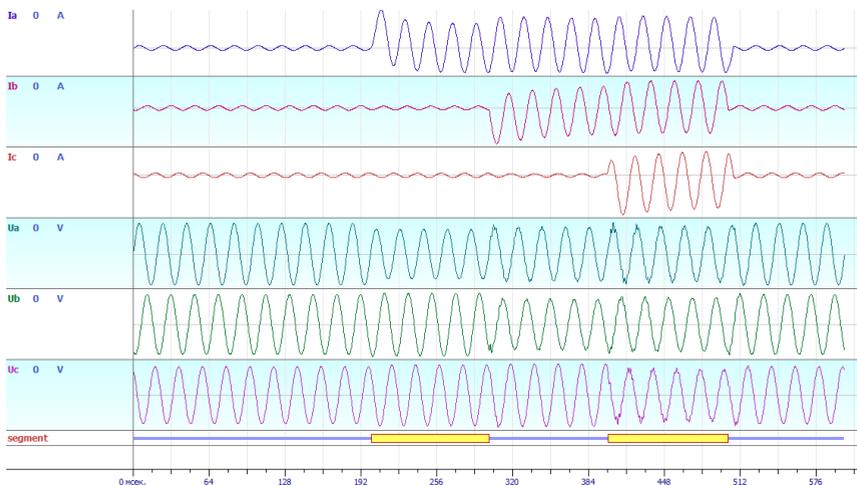


Рис. 5. Осциллограмма аварийного события

Таблица

Результаты работы алгоритма

Сегмент	Реальное значение		Расчетное значение	
	Начало, с	Конец, с	Начало, с	Конец, с
№1	0	0.2	0	0.2008
№2	0.2	0.3	0.2008	0.3
№3	0.3	0.4	0.3	0.4002
№4	0.4	0.5	0.4002	0.5004
№5	0.5	0.6	0.5004	0.6

Выводы

В данной работе был рассмотрен метод сегментации осциллограмм аварийных событий с использованием непрерывного вейвлет преобразования. Особенностью данного метода является его инвариантность относительно формы исследуемого сигнала, таким образом его применимость может выходить за рамки энергетических задач. Полученная на экспериментальной осциллограмме погрешность составляет не более 2-3 отсчетов измеряемого сигнала, что позволяет использовать эти результаты в алгоритмах мониторинга систем РЗА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.М. Шнеерсон, Цифровая релейная защита, Энергоатомиздат, 2007, р. 549.

2. Д.С. Осипов, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук «Модели и методы вейвлет анализа несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей 0,4–110 кВ» 2018.

3. Б. С.В., «Непрерывное вейвлет-преобразование и точно решаемая модель нестационарных сигналов» Журнал технической физики, 2012, том 82, вып. 7.

4. Hui Li, «Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation July 6-9 2010, Jinan, China,» в Complex Morlet Wavelet Amplitude and Phase Map Based Bearing Fault Diagnosis.

5. Г. Шарк, Применение вейвлетов для цифровой обработки сигналов, Москва: Техносфера. 192 с, 2007.

Авторы:

Кондрашов Николай Сергеевич, завершил обучение в магистратуре Санкт-Петербургского Политехнического университета по специальности «Автоматика энергетических систем» в 2021 году. E-mail:k73.kondrasov@gmail.com.

Богданов Александр Владимирович, старший преподаватель, СПбПУ, закончил электромеханический факультет СПбГТУ в 2000 году. E-mail:al.vl.bogdanov@gmail.com.

Попов Станислав Олегович, кандидат технических наук, доцент СПбПУ. Закончил электромеханический факультет СПбПУ в 2008 году, защитил диссертацию в СПбПУ в 2013 году по теме «Повышение эффективности дифференциальной защиты трансформаторов». E-mail: rorov_so@mail.ru.

Соловьева Светлана Николаевна, старший преподаватель СПбПУ. Закончила ЭлМФ ПГПИ в 2006 году. E-mail: s.n.solovjeva@gmail.com.

АЛГОРИТМЫ БЛОКИРОВКИ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ ЦЕПЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ. ОДНОВРЕМЕННЫЙ МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Воробьев Е.С., Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Антонов В.И., Солдатов А.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Одним из главных требований, предъявляемых к блокировке при неисправностях цепей напряжения (БНН) является ее срабатывание при повреждениях во вторичных цепях трансформатора напряжения (ТН), и несрабатывание при КЗ в первичной сети. Однако применяемые в отечественной и иностранной практике релейной защиты (РЗА) алгоритмы БНН имеют свои недостатки и могут ложно срабатывать или не действовать вовсе. В статье излагаются принципы реализации БНН отечественных и иностранных производителей РЗА.*

***Ключевые слова:** релейная защита, БНН, цепи напряжения, неисправность.*

Введение

В цепях напряжения возможны несимметричные (обрыв или КЗ одной, или двух фаз) и симметричные (трехфазный обрыв или КЗ) повреждения. При КЗ или обрыве во вторичной цепи ТН напряжение на входе ИО снижается до нуля, что может привести к ложному срабатыванию релейной защиты. Для предотвращения ложной работы используется блокировка при неисправностях в цепях напряжения (БНН). Основным требованием к БНН является срабатывание при неисправностях во вторичных цепях трансформатора напряжения, и несрабатывание при КЗ в первичной сети.

В отечественной практике получил распространение принцип сравнения напряжений звезды и разомкнутого треугольника ТН. За рубежом обычно применяется БНН, основанный на принципе обнаружения составляющих обратной и нулевой последовательностей [1].

Целью статьи является изложение принципов реализации алгоритмов БНН иностранных и отечественных производителей микропроцессорной РЗА, основанных на одновременном мониторинге напряжений и токов.

вильной работы защиты в этом режиме в схеме вводится выдержка времени на срабатывания «*TFltFix*», выводящая из действия токовый критерий снятия блокировки. Значение «*TFltFix*» выбирается больше максимального времени отключения КЗ на смежных участках электрической сети, с целью предотвращения фиксации неисправности ТН при несимметрии напряжения, вызванном внешнем КЗ [2].

Уставки по напряжению обратной U_{2set} и нулевой U_{0set} последовательности выбираются выше максимального напряжения небаланса в нормальном режиме электрической сети, но ниже напряжений при повреждениях в цепи. Уставки по току обратной I_{2set} и нулевой I_{0set} последовательности должны выбираться выше максимального тока небаланса, но ниже тока при удаленном повреждении в электрической сети, сопровождающемся повышением напряжения обратной и нулевой последовательности выше значений U_{2set} и U_{0set} .

Если минимальный ток повреждения оказывается ниже максимального тока небаланса, то контроль уровней тока обратной и нулевой последовательности не может использоваться для разграничения режимов повреждения в цепи ТН и КЗ во внешней сети. В этом случае для обнаружения несимметричных повреждений контролируют приращение этих токов (рис. 2). Полная схема обнаружения несимметричного повреждения в цепях ТН приведена на рис. 1.

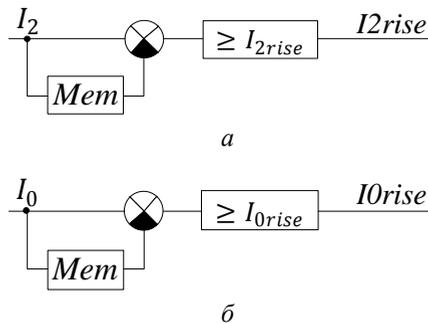


Рис. 2. Детекторы изменения тока: *а* – обратной последовательности; *б* – нулевой последовательности

Симметричные повреждения в цепи ТН характеризуется одновременным снижением трех напряжений при нормальном уровне фазных токов. Для обнаружения такого вида повреждений контролируются напряжения и ток прямой последовательности (рис. 4, а) или напряжения и фазные токи (рис. 4, б) [2].

Возможны несколько ситуаций, когда напряжение снижается: неисправность в цепи ТН, включение ЛЭП с отключенным ТН и близкие КЗ. В первом и втором случае функция БНН должна заблокировать действие защиты, а в третьем случае блокировка должна позволить защите отключить повреждение. Для разграничения этих режимов используется контроль тока прямой последовательности или фазных токов. Уставки по напряжению U_{1set} и U_{phset} выбирается ниже минимального рабочего напряжения. Уставки по току прямой последовательности I_{1set} и фазному току I_{phset} должны быть выше максимального нагрузочного тока (для отстройки от включения ЛЭП с отключенным ТН), но ниже минимального тока повреждения.

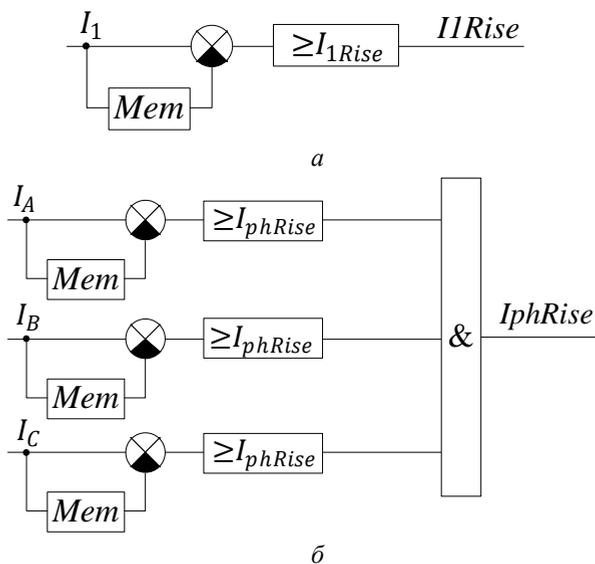


Рис. 3. Детекторы изменения: а – тока прямой последовательности; б – фазного тока

Если ТН установлен со стороны ЛЭП, то при отключении ЛЭП напряжение и ток равны нулю, что характерно и для неисправности ТН. Для предотвращения излишнего срабатывания в этом режиме схема дополняется сигналом положения блок-контакта выключателя «CBCIs» (рис. 4).

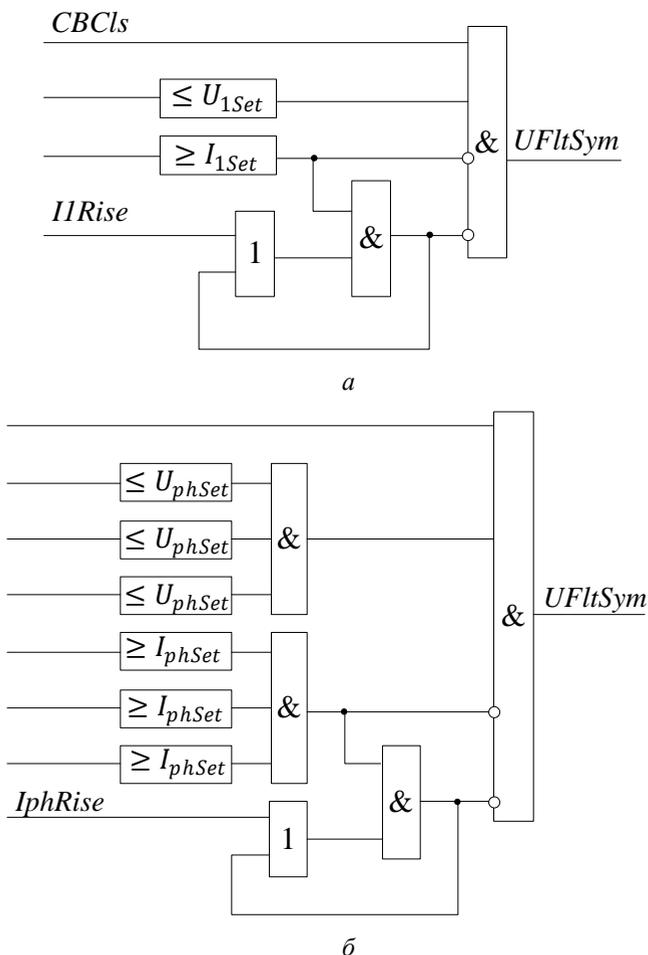


Рис. 4. Полная схема обнаружения симметричных повреждений: *a* – с использованием электрических величин прямой последовательности; *б* – с использованием фазных электрических величин

Если минимальный ток повреждения оказывается ниже максимального нагрузочного тока, то аналогично блокировке при несимметричных повреждениях, для обнаружения КЗ контролируют приращение тока (рис. 3).

Полная схема обнаружения симметричного повреждения в цепях ТН представлена на рис. 4.

Выводы

БНН на основе одновременного мониторинга напряжений и токов не позволяет контролировать обрыв нулевого провода «звезды», поскольку в этом режиме при симметричной нагрузке не появляется составляющей нулевой последовательности. Поэтому функция не чувствует это повреждение. Введение искусственной несимметричной нагрузки ТН позволяет обнаружить повреждение по появлению напряжения нулевой последовательности. Такой признак может использоваться в сети с глухозаземленной нейтралью. В сети с изолированной нейтралью появление напряжения нулевой последовательности может являться признаком ОЗЗ и неисправностью нулевого провода, и не может использоваться для обнаружения обрыва.

Блокировка может кратковременно сработать при КЗ в примыкающей сети, сопровождающемся появлением несимметрии напряжения при малых токах нагрузки. Однако это не создает опасности несрабатывания защиты при КЗ на защищаемой ЛЭП, поскольку при этом токовый признак позволяет быстро снять блокировку при внутренних КЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дони Н.А., Сдобин А.В. Об использовании обмоток ТН, соединенных в «разомкнутый треугольник / Н.А. Дони, А.В. Сдобин // Релейщик. –2009. – №4. – С.73-77.
2. Loss of ac Voltage Considerations For Line Protection. – A report prepared for the Line Protection Subcommittee Of the IEEE Power Engineering Society. – Power System Relaying Committee. – 28 с.
3. Руководство по эксплуатации C53000-G1156-C155-8. Дистанционная защита 7SA522 (версия 4.61). – 2017. – С. 356-360.

Авторы:

Воробьев Евгений Сергеевич, инженер 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2019 году окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: vorobev_es@ekra.ru.

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки ИЭУ НПП «ЭКРА». Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в 2013 году на кафедре ТОО и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Глазырин Анатолий Вячеславович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2020 году окончил Энергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматика». E-mail: glazyrin_av@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера-электрика в 1978 году на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 году защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, Заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2006 году электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

АЛГОРИТМЫ БЛОКИРОВКИ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ ЦЕПЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ. СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЗВЕЗДЫ И РАЗОМКНУТОГО ТРЕУГОЛЬНИКА

Воробьев Е.С., Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Антонов В.И., Солдатов А.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Одним из главных требований, предъявляемых к блокировке при неисправностях цепей напряжения (БНН) является ее срабатывание при повреждениях во вторичных цепях трансформатора напряжения (ТН), и несрабатывание при КЗ в первичной сети. В статье излагаются принципы реализации БНН отечественных и иностранных производителей РЗА.

Ключевые слова: релейная защита, БНН, цепи напряжения, неисправность.

БНН на принципе сравнения напряжений звезды и разомкнутого треугольника

Рассмотрим принцип БНН на примере ТН, схема соединения обмоток и векторная диаграмма которого приведены рис. 1.

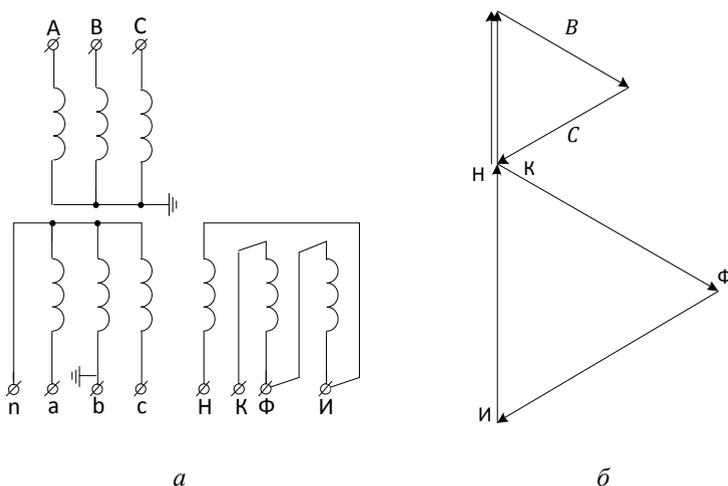


Рис. 1. Принцип принцип БНН на примере ТН: а – схема соединения обмоток трансформатора с особой фазой А; б – векторная диаграмма

В классической реализации (например, в реле КРБ-12М) БНН реагирует на напряжение небаланса [1].

$$\dot{U}_{\text{нб}} = 2\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \frac{\dot{U}_{\text{НК}}}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{U}_{\text{НИ}}}{\sqrt{3}} = \dot{U}_{\text{нб1}} + \dot{U}_{\text{нб2}},$$

где $\dot{U}_{\text{нб1}} = \left(3\dot{U}_{0Y} - \frac{3\dot{U}_{0\Delta}}{\sqrt{3}} \right)$, $\dot{U}_{\text{нб2}} = \left(\dot{U}_A - \frac{\dot{U}_{\text{НИ}}}{\sqrt{3}} \right)$.

Схема выявления повреждения в цепях напряжения представлена на рис. 2.

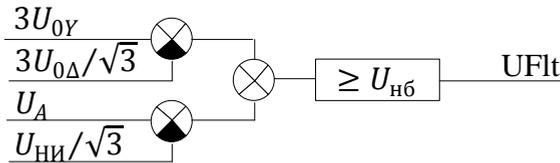


Рис. 2. Схема выявления повреждения в цепях напряжения по принципу КРБ-12М

В случае повреждения в цепи ТН баланс нарушается: при замыканиях на землю и обрывах возникает первая составляющая $\dot{U}_{\text{нб1}}$, а при повреждениях фазы А – вторая составляющая $\dot{U}_{\text{нб2}}$.

Рассмотренный принцип предусматривает выбор особой фазы, для которой рассчитывается вторая составляющая напряжения небаланса. Блокировка срабатывает при всех видах КЗ в цепях ТН, за исключением междуфазного КЗ не затрагивающего особую фазу (для особой фазы А – это междуфазное КЗ фаз ВС). В этом случае блокировка действует с замедлением до срабатывания предохранителя или автоматического выключателя ТН и переходе КЗ в режим обрыва цепи.

Для облегчения поиска поврежденной цепи может использоваться алгоритм с отдельным контролем составляющих небаланса (рис. 3-4).

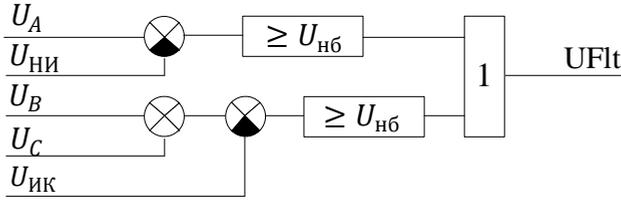


Рис. 3. Схема выявления повреждения в цепях напряжения с отдельным контролем составляющих небаланса

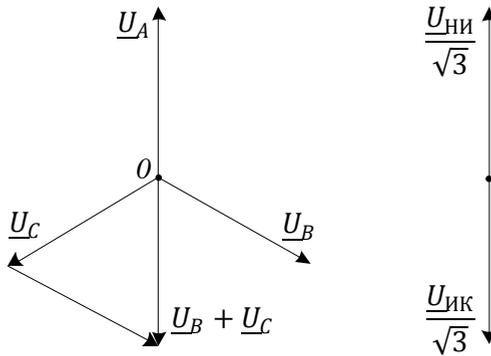


Рис. 4. Векторные диаграммы напряжений

Выводы

При реализации БНН на основе сравнения напряжений звезды и разомкнутого треугольника ТН для выявления междуфазных замыканий (в том числе междуфазного замыкания, не затрагивающего особую фазу) в цепях «звезды» необходимо использовать контроль величин напряжений и тока обратной последовательности.

При использовании ТН с «разомкнутым треугольником» сложно контролировать целостность соединительных цепей выводов «Н» и «К». В нормальном режиме $U_{HK} \approx 0$, и нельзя однозначно сказать – обрыв это или нормальный режим. Обычно для контроля используют факт наличия составляющей третьей гармоники напряжения.

Преимущества и недостатки рассмотренных алгоритмов, основанных на сравнении напряжений звезды и разомкнутого треугольника (данная работа) и одновременном мониторинге напряжений и токов [2] сведены в таблицу.

Таблица

Достоинства и недостатки алгоритмов БНН

Принцип БНН	Достоинства	Недостатки
Обнаружения составляющих обратной и нулевой последовательностей	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не требует дополнительной обмотки ТН. 2. Позволяет выявить неисправность в первичной обмотке ТН. 3. Весь необходимый набор сигналов доступен в цифровой подстанции по протоколу МЭК 61850–9.2LE. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не контролируется обрыв нулевого провода. 2. Кратковременная ложная работа при внешнем КЗ в условиях малой нагрузки. 3. Требуется расчет уставок.
Сравнения напряжений звезды и разомкнутого треугольника ТН	<ol style="list-style-type: none"> 1. Выявляет все виды повреждений. 2. Не требует расчета режимов электрической сети при выборе уставок. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не позволяет выявить обрыв в первичной обмотке ТН. 2. Замедление срабатывания при междуфазном замыкании, не затрагивающем особую фазу, в цепях звезды 3. Если одновременно срабатывают защитные автоматические выключатели и в цепи звезды, и в цепи треугольника, то БНН отказывает в действии. 4. Требуется ТН с дополнительной обмоткой. 5. Сложность контроля обрыва цепи НК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.049 РЭ. Шкаф дистанционной и токовой защит линии типа ШЭ2607 021021, ШЭ2607 021.

2. Воробьев Е.С. Алгоритмы БНН. Одновременный мониторинг напряжений и токов / Е.С. Воробьев, Н.Г. Иванов и др. // Сборник работа V Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности, Чебоксары, 2021

Авторы:

Воробьев Евгений Сергеевич, инженер 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2019 г. Электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: vorobev_es@ekra.ru.

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки ИЭУ НПП «ЭКРА». Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в 2013 г. на кафедре ТОО и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Глазырин Анатолий Вячеславович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. Электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматика». E-mail: glazyrin_av@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2006 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ – ЦИФРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛНОГО СПЕКТРА ЦИФРОВЫХ УСЛУГ

Иванова В.Р., ФГБОУ ВО «Казанский Государственный энергетический университет», г. Казань, Россия

***Аннотация.** В работе представлен обзор цифровых технологий эксплуатируемых и планируемых к применению в разных областях деятельности человека. Основной акцент в работе выполнен на технологии Интернета вещей (IoT-технология). Рассмотрены основные принципы построения таких систем, указаны преимущества, недостатки и возможности применения.*

***Ключевые слова:** цифровые технологии, интернет вещей, трансформация, средства идентификации, передача данных, интернет-фейс, стандарт.*

С использованием всех возможных цифровых технологий стало возможным получение усовершенствованных услуг благодаря наличию мониторинга и обновления информации с высокой скоростью и тем самым обеспечения максимальных эксплуатационных возможностей оборудования и техники.

Развитие цифровых технологий является одним из важнейших факторов экономического роста. Так внедрение ЦТ происходит быстрее, чем внедрение любых других инновационных разработок в истории, использование ЦТ способствует расширению коммуникационных возможностей и доступа к финансовым, коммерческим и государственным услугам.

Цифровые технологии (ЦТ) подразумевают не просто банальный переход в режим *Online*, а предполагают обеспечение полного спектра цифровых услуг: человеко-машинный интерфейс; система сбора и обработки данных для полного управления по заданному алгоритму; прогнозирование и отчетность о техническом обслуживании на площадке и др.

К основным направлениям развития ЦТ следует отнести следующие технологии: цифровые двойники (*DigitalTwins*); промышленный интернет вещей (*IIoT*); большие данные (*bigdata*); машинное обучение (*Machinelearning*); распределенные реестры (*Blockchain*). Основные ожидаемые эффекты от внедрения перечисленных ЦТ – снижение себестоимости всех бизнес-

процессов компании; снижение операционных затрат; автоматизированная обработка массивов данных в рамках задач онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений при наличии соответствующих математических алгоритмов; развитие новых видов сервисов сетевых компаний для субъектов рынка [3, 4, 5].

Внедрение ЦТ еще более значительно упрощает задачи оптимизации. Так наиболее востребованным способом обеспечения готовых решений по аккумулярованию на единой платформе, контроля множества процессов и моментальности управления стал «Интернет вещей» (*Iot*-технология). Технически такая система реализуется с помощью логистически оптимизированной цепочки взаимодействия различных стационарных средств измерения, центра сбора и анализа поступающих данных с помощью технологий связи для обмена информацией.

Организация такой сети будет исключать необходимость участия человека из части действий и операций. Предлагаемая *Iot*-технология использует средства автоматической идентификации для взаимодействия физических объектов (предметов) между собой и внешними объектами путем подключения всех устройств диагностики в локальную или облачную систему для анализа [1, 2].

В основе Интернета вещей лежат следующие технологии: средства идентификации (радиочастотные, биометрические, контактные и бесконтактные); средства измерения (датчики температуры, давления, освещенности; приборы учета (пример – интеллектуальные датчики); сложные интегрированные измерительные системы); средства передачи данных (различные коммуникационные устройства, гарантирующие обмен сообщениями между конечными устройствами); средства обработки данных (телефонная, компьютерная, беспроводная, конвергентная); исполнительные устройства (промышленные контроллеры, системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления).

Для реализации систем, построенных по *Iot*-технологии представляет интерес использование виртуальных (программные) приборов, где исполнительные механизмы передают в него сигналы, которые обрабатываются и выдаются в реальный мир с их же помощью.

Примером не сетевого интерфейса (точка-точка), предназначенного для интеллектуализации дискретных датчиков (например, концевой датчик или исполнительное устройство), где «общение» происходит по сигнальной цепи, выступает промышленный коммуникационный интерфейс *IO-link*. Он обеспечивает сохранение совместимости всех оконечных устройств – при включении питания они работают в нормальном режиме сухого контакта, переключаясь в коммуникационный контакт только после выполнения мастером определенной процедуры. Предложен интерфейс комитетом организации пользователей *Profibus*, разработчиком семейства промышленных интерфейсов *Profibus*. Впоследствии стандартизирован как международный стандарт ИЕС 61131-9 «*Programmable controllers – Part 9: Single - drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI)*». В России адаптирован как ГОСТ Р МЭК 61131-9 «Контроллеры программируемые».

Для взаимодействия между собой устройства используют различные промышленные протоколы. Одним из популярных протоколов для этой цели является *MQTT*. *MQTT* (Message Queue Telemetry Transport) – это упрощенный протокол обмена данными, работающий поверх TCP/IP. Он хорошо подходит для использования в контроллерах и датчиках, где требуется небольшой размер кода и существуют ограничения по пропускной способности канала.

В настоящее время количество оцифрованной информации постоянно растет, поэтому такие компании как Microsoft полагают, что главная часть Интернета вещей – это не датчики и средства передачи данных, а облачные системы и туманные вычисления, обеспечивающие высокую пропускную способность и способность быстро реагировать на определенные ситуации.

Отличительной особенностью туманных вычислений от облачных является возможность с их помощью осуществлять сбор и анализ данных более близкий к пользователю, тем самым обеспечивая создание еще одного уровня управления. Например, в плоскости данных, туманные вычисления позволяют вычисляющим операторам находиться непосредственно в границах сети, а не на серверах дата-центров. Основными преимуществами использования облачных сетей являются – низкая задержка

передачи данных, мобильность, развитая география, большое количество узлов сети, улучшение возможностей беспроводного доступа.

В основе концепции Интернета вещей предполагается построение сети между большим количеством узлов и устройств, облачные технологии позволяют создать такую сеть. Для бесперебойной работы сетей с использованием облачных технологий нового уровня предстоит решение двух главных задач – техническое взаимодействие устройств в контексте *IoT* и выбор или разработка проприетарных протоколов связи для наиболее эффективной работы подобных систем.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (номер темы 075-00063-20-02).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Шэн, Ло И. Способ осуществления связи посредством интернета вещей, устройство на стороне сети и терминал интернета вещей. Патент на изобретение, 2019. № 2693293.
2. Ядгарова Ю.В. Модель и алгоритм выбора программной архитектуры для систем интернета вещей. Программные продукты и системы. № 4, 2019. С. 682-689.
3. Иванова В.Р., Жукова Ю.В. О цифровой трансформации в сфере энергетики. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», 2021. С. 200-203.
4. Иванова В.Р. О принципах построения цифровых промышленных сетей. Научный периодический журнал «NovaUm.Ru», 2020. № 25. С. 1-4.
5. Иванова В.Р., Каримуллин С.М. Перспективы внедрения цифровых подстанций. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», 2020. Т. 1. С. 197-201.

6. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Роженцова Н.В. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S SCHNEIDER ELECTRIC. Изв. вуз. «Проблемы энергетики». Т.22 (2), 2020. С. 75-85.

DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85

Автор:

Иванова Вилия Равильевна, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» ФГБОУ ВО «Казанский Государственный энергетический университет». E-mail: vr-10@mail.ru.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Мироненко Я.В., АО «РЭС Групп», г. Владимир, Россия.

***Аннотация.** Приоритетным в развитии диагностики в энергетике становится создание аналитических программных продуктов, нацеленных на оценку состояния электрооборудования. Предложен метод анализа данных диагностического мониторинга с использованием алгоритмов машинного обучения. Рассмотрены характеристики обучающей и тестовой выборки и определены наиболее эффективные алгоритмы машинного обучения и наиболее информативные и доступные для мониторинга диагностические параметры на примере маслонаполненного трансформатора. Полученные высокие значения точности работы нескольких диагностических моделей, использующих алгоритмы машинного обучения, говорят о перспективности использования предложенного подхода.*

***Ключевые слова:** диагностика высоковольтного оборудования, мониторинг температуры и влажности, мониторинг частичных разрядов, машинное обучение.*

На сегодняшний день задача повышения достоверности и информативности диагностики электроэнергетического оборудования является не только приоритетом программы цифрови-

зации энергетики, установленной правительством Российской Федерации [1], но и залогом функционирования энергетической системы страны в условиях, когда до 70 % основных фондов отрасли физически и морально изношены [2], а размер инвестиционной программы системообразующей сетевой организации - ПАО «Россети» с 2020 по 2024 год планомерно снижается на 38,5 % [3].

Как следует из заявленной государственной программы, речь не идет о совершенствовании способов получения диагностической информации. Технические характеристики измерительных приборов и оборудования для мониторинга диагностических параметров достаточны для решения поставленных задач. Драйвером для достижения ключевых показателей становятся системы анализа и обработки данных диагностического мониторинга, т.е. меняется подход к интерпретации измеренных и зафиксированных значений.

Процесс обработки данных диагностического обследования, как правило, носит экспертный характер. Вывод о состоянии конкретной единицы принимается в зависимости от комбинации различных факторов, и интерпретируется соответственно. Универсальный подход не закреплен на сегодняшний день никаким нормативным документом и выбирается конкретным экспертом. Интуитивно-понятные и легко интерпретируемые правила, которые можно представить в виде простейших продукций, заменяются либо на сложные математические преобразования достаточно больших рядов данных, либо на абстрактную выборку, часто основанную на интуиции человека-эксперта.

В условиях ограниченности количества специалистов-экспертов и роста количества данных от постоянно совершенствующихся средств диагностики, вывод о состоянии объекта можно поручить сделать с помощью экспертной компьютерной системе. Развитие искусственного интеллекта в последние годы позволяет говорить о возможности применения экспертных систем, построенных на базе нечеткой логики, или машинного обучения [4]. При этом наиболее эффективными для целей технической диагностики показало себя использование ансамблевых методов и нейронных сетей [5]. Сравнительные характеристики указанных методов представлены в табл. 1.

Выбор метода машинного обучения в этом случае определяются в первую очередь характеристиками имеющейся обучающей выборки, которая, в свою очередь представляет данные диагностического мониторинга с подтвержденным состоянием обследуемого объекта.

Количество данных по результатам диагностического мониторинга может быть достаточным для создания большой обучающей выборки, но ситуация, в целом, будет бесперспективной, если эти данные не будут отнесены к одному из подтвержденных статусов состояния объекта, например, «исправно» / «находится в аварийном состоянии». Для подтверждения статуса должны использоваться либо результаты независимого обследования по другим информативным технологиям, например, ХАРГ маслonaполненного оборудования для результатов мониторинга ЧР, либо, с оговорками, комплексная оценка работы объекта на протяжении длительного времени.

Таблица 1

Сравнение различных методов машинного обучения

Метод	Преимущества	Недостатки
Нейронные сети	Наиболее точные модели, использующие самые различные исходные данные	Требует большого количества данных в обучающей выборке
Бустинг	Небольшая чувствительность к смещению. Хорошие результаты для сравнительно больших выборок	Для небольших выборок показатели точности уступают прочим моделям
Бэггинг	Лучшая техника для сравнительно небольших несбалансированных обучающих выборок	Существенно уступает по точности прочим методам для больших выборок. Снижение результатов для выборок с большим смещением

В технической диагностике, как правило, большую часть данных нельзя отнести к подтвержденному статусу, а меньшая часть относится к состоянию «исправно». На долю данных диагностического обследования с подтвержденным неисправным

статусом приходится очень маленькая часть выборки. Все это, в конечном счете, приводит к несбалансированности выборки, что существенно снижает точность экспертных моделей, использующих машинное обучение.

Для снижения несбалансированности выборки и ее объемного увеличения в части информативных данных можно использовать такие диагностические параметры, которые с одной стороны легко получать, а с другой хранить в течение продолжительного времени. Это позволит при необходимости провести их ревизию после аварийной ситуации и получить, таким образом, более сбалансированные данные для выборки. Перечень перспективных для целей обработки моделями машинного обучения, диагностических параметров представлен в табл. 2. Все указанные параметры являются с одной стороны, достаточно информативными, а с другой сложно интерпретируемым для целей диагностики. Наблюдение и оценка отдельных параметров в течение продолжительного времени позволяет более объективно оценить состояние объекта и обнаружить возникающие дефекты на ранних стадиях.

Таблица 2

Диагностические параметры, перспективные для использования в диагностических моделях, использующих машинное обучение

Наименование параметра	Особенности использования параметра	Источник данных для диагностической системы
Изменение температуры в баке трансформатора за продолжительное время	Необходимо корректировать с учетом температуры внешней среды	Датчик температуры бака трансформатора и датчики измерения температуры окружающей среды
Кажущийся заряд ЧР внутри бака трансформатора	Необходимо оценивать с учетом помех	Датчик частичных разрядов СВЧ диапазона частот в баке трансформатора
Изменение влажности трансформаторного масла		Датчик влагосодержания в масле бака трансформатора
Кажущийся заряд ЧР в высоковольтных вводах	Необходимо оценивать с учетом помех	Датчик регистрации токов проводимости и ЧР в высоковольтных вводах

Для оценки состояния изоляции маслонаполненных трансформаторов были разработаны 4 диагностические модели, которые использовали разные алгоритмы машинного обучения и данные по мониторингу различных диагностических параметров, в качестве исходных (данные «features» в машинном обучении).

Точность модели на тестовой выборке рассчитывалась как отношение числа истинных прогнозов в тестовой выборке (истинность прогноза подтверждалась тождественностью прогноза и результата другого диагностического обследования – данных «target» в машинном обучении) к общему числу прогнозов в тестовой выборке. Полученные результаты представлены на рисунке.

Была достигнута достаточная точность вывода о состоянии высоковольтного энергетического оборудования при применении моделей машинного обучения.

Точность работы каждой модели не ниже 0,65, при этом лучшие результаты были достигнуты при использовании разных диагностических параметров – температуры/влажности масла и кажущегося заряда ЧР. Высокая точность данных алгоритмов в первую очередь объясняется характеристиками выборки – сравнительно небольшим размером с большим смещением.

Перспективным выглядит дальнейшее совершенствование моделей при расширении выборки, и их использования для целей практической диагностики.

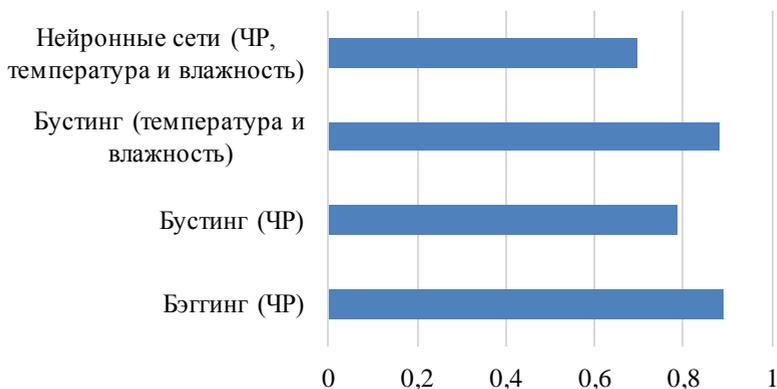


Рисунок. Достигнутая точность диагностических моделей, использующих машинное обучение

ЛИТЕРАТУРА

1. *Солонина А.И.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

2. Описание ведомственного проекта Министерства энергетики Российской Федерации «Цифровая энергетика». URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/vedomstvennyij-proekt-tsifrovaya-energetika.pdf> (дата обращения: 28.10.2021)

3. *В.В. Андросов, С.С. Чернов.* Экономическое содержание стоимости и инвестиционная активность энергопредприятий. ВЕСТНИК ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления, № 26, 2018.

4. Инвестиционная программа ПАО "РОССЕТИ". URL: <https://www.rosseti.ru/investment/dzo/long/> (дата обращения: 28.10.2021)

5. *Шахнин В.А., Мироненко Я.В.* Применение методов нечеткой логики для электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования. //Сборник докладов X-ой Юбилейной Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологий». / Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013;

6. *Fenton, W., McGinnity, T., Maguire, L.:* Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques: a review. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – Pt. C 31(3), 269–281 (2000)

7. *Мироненко Я.В.* Перспектива развития технологий диагностики высоковольтного электроэнергетического оборудования / Я.В. Мироненко //Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции 16-17 октября 2020 г. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2020. – С. 130–136.

8. *Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В.* Статистические характеристики частичных разрядов как диагностические признаки состояния изоляции высоковольтного оборудования // Контроль. Диагностика. – 2015. – №2. – С. 59–65.

Авторы:

Мироненко Ярослав Владимирович, заместитель генерального директора АО «РЭС Групп». Факультет радиофизики электроники и медицинской техники Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. E-mail: yaroslav.mironenko@inbox.ru.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В СКОЛЬЗЯЩЕМ ВРЕМЕННОМ ОКНЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТОКА

Андреев О.Н., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Устройства релейной защиты проводят обработку сигналов в режиме реального времени. При нелинейных искажениях точное восстановление сигнала основной частоты с малой задержкой по времени является сложной задачей. В работе показано, что наряду с дискретным преобразованием Фурье, для восстановления амплитуды, частоты и фазы сигнала основной частоты может использоваться аппарат искусственных нейронных сетей.*

***Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, цифровая обработка сигналов, фильтрация в реальном времени.*

В электрических цепях из-за нелинейных нагрузок в рабочих режимах возникают нелинейные искажения [1,2] сигналов тока и напряжения. Основной причиной нелинейных искажений сигнала являются потребители, имеющие нелинейные входные цепи такие как: силовое оборудование [3,4]; устройства, работающие по принципу формирования электрической дуги; насыщаемые приборы. В результате работы такого оборудования нелинейно искажается сигнал, который, в свою очередь, поступает на вход устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) [5]. При подобных нелинейных искажениях возможно ложное отключение в распределительных сетях.

В устройствах РЗА для точного определения амплитуды, частоты, фазы и гармонических составляющих сигнала широко применяются адаптивная фильтрация [6] и алгоритмы дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Обработку сигналов необходимо проводить за минимальное время. Одно из необходимых условий для точной работы ДПФ – временное окно наблюдения, кратное периоду самого сигнала. Таким образом, минимальное время задержки для точной работы ДПФ составляет период сигнала тока или напряжения. Так же следует учитывать задержки, связанные с предварительной фильтрацией сигнала и определением его частоты, поскольку точность алгоритма ДПФ на одном периоде, без задания значения частоты оказывается низкой.

Наряду с классическими методами в цифровой обработке сигнала (ЦОС) находит применение аппарат искусственных

нейронных сетей (ИНС) [7-9]. В частности, наибольшее распространение получили простейшие нейронные сети прямого распространения с 1 или 2 скрытыми слоями (персептрон)[10,11].

По аналогии с ДПФ на вход ИНС подаются выборки дискретизированного аналогового сигнала, но при этом на выходе ИНС наряду с амплитудой и фазой сигнала задается частота основной гармоники. Таким образом, для работы ИНС отсутствует необходимость предварительного определения частоты основного сигнала. Персептрон необходимо предварительно обучить и протестировать, для этого требуется большое количество записей сигналов (от 1000 до 100000) во всём диапазоне возможных значений параметров исходного аналогового сигнала.

В данной работе предлагается использовать простейшую ИНС для оценки следующих параметров сигнала тока: значение основной частоты сигнала, значение амплитуды и фазы сигнала основной частоты, значение амплитуды второй гармоники. Моделирование обучающих и тестовых сигналов проводится на качественном уровне, для упрощения вычислений использована следующая простейшая формула:

$$I(t) = A_{1r} \sin(2\pi \cdot f_r \cdot t + \varphi_r) + A_{2r} \sin(4\pi \cdot f_r \cdot t + 2\varphi_r) + \\ + A_{3r} \sin(6\pi \cdot f_r \cdot t + 3\varphi_r) + A_{5r} \sin(10\pi \cdot f_r \cdot t + 5\varphi_r) + A_{7r} \sin(14\pi \cdot f_r \cdot t + 7\varphi_r),$$

где A_{1r} , A_{2r} , A_{3r} , A_{5r} , A_{7r} , f_r , φ_r – случайные величины, которые равномерно распределены в следующих диапазонах: A_{1r} – от 0,6 до 1; A_{2r} – от 0,01 до 0,6; A_{3r} – от 0,01 до 0,1; A_{5r} – от 0,01 до 0,05; A_{7r} – от 0,01 до 0,03; f_r – от 45 до 55 Гц; φ_r – от 0 до 2π .

ИНС имеет распределённую сетевую структуру, которая представлена на рис. 1.

Аналоговый сигнал тока $I(t)$ предварительно дискретизирован с частотой 2400 Гц. Число входных нейронов $n = 15$, что соответствует временному интервалу 6,25 мс, за который восстанавливаются параметры сигнала. Количество нейронов в скрытом слое подбиралось опытным путём. Увеличение количества нейронов в скрытом слое приводит к существенному увеличению вычислительного времени, но качественно не влияет на результаты работы нейросетевого алгоритма.

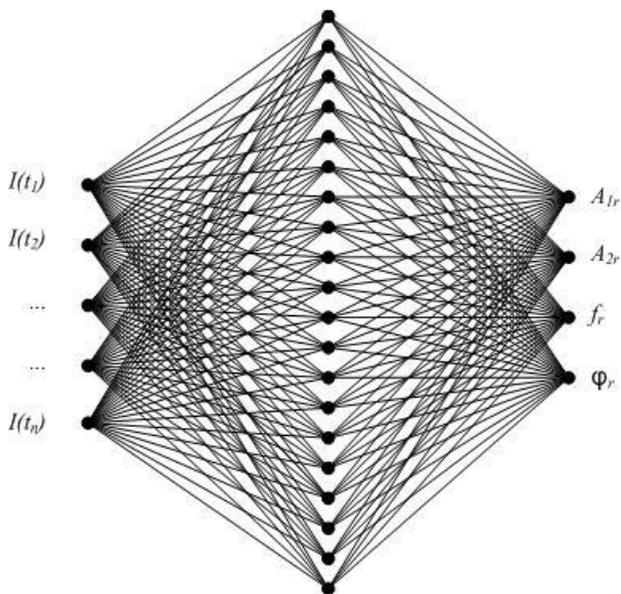


Рис. 1. ИНС для анализа параметров сигнала

Обучение и проверка работы ИНС проводилось в открытой аналитической платформе DEDUCTOR (www.basegroup.ru). Эта платформа позволяет строить модель ИНС, тестировать её и визуализировать полученные результаты. Пример оценки качества обучения нейросети по амплитуде основной гармоники A_{1r} показан на рис. 2. В 95 % случаях максимальная погрешность определения амплитуды основной гармоники тестового сигнала не превышает 6 % от диапазона вырованиия, ил4оимальной амплитуды сигнала.

Для значений амплитуды второй гармоники A_{2r} , частоты f_r и фазы φ_r ошибки оказываются несколько выше.

В качестве примера в режиме «если-то» на вход ИНС был подан сигнал с входными параметрами $A_{1r} = 1$; $A_{2r} = 0,6$; $A_{3r} = 0,10$; $A_{5r} = 0,05$; $A_{7r} = 0,03$; $f_r = 50$ Гц; $\varphi_r = 0$. На выходе ИНС были получены следующие параметры: $A_{1r} = 0,981$; $A_{2r} = 0,450$; $f_r = 52,126$ Гц; $\varphi_r = 6,283$.

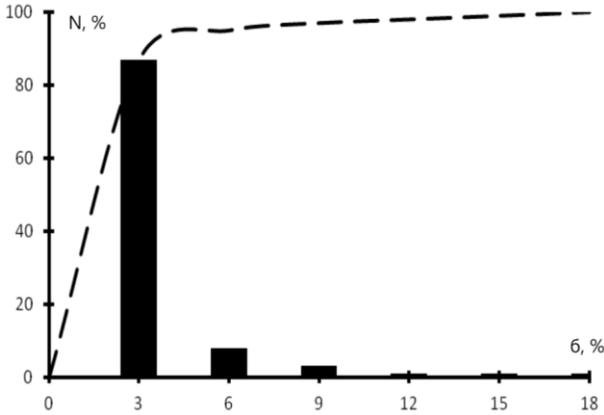


Рис. 2. Гистограмма распределения ошибок на выходе ИНС при расчете амплитуды сигнала основной частоты; интервал оцифровки – 15 отсчетов или 6,25мс; пунктир – сумма с накоплением

Восстановление сигнала может происходить в режиме реального времени в скользящем окне. Для фильтрации редких максимальных ошибок можно применить медианное сглаживание. Результат работы ИНС показан на рис. 3.

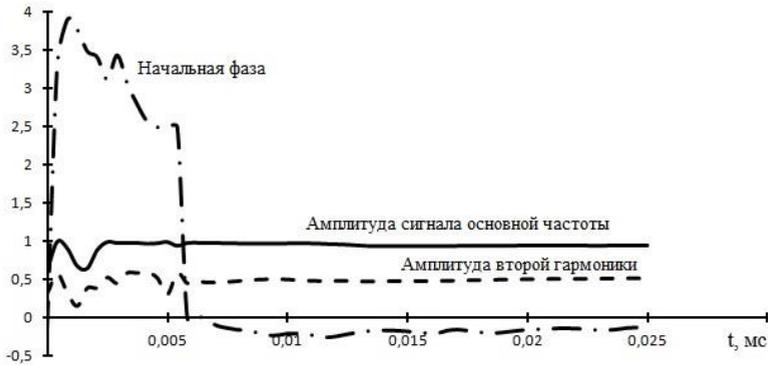


Рис. 3. Результат работы алгоритма ИНС по мере попадания сигнала в окно 6,25 мс: сплошная – выделение амплитуды основной гармоники в составе входного сигнала, пунктир – выделение амплитуды второй гармоники в составе входного сигнала, точка-пунктир – выделение фазы основной гармоники

Для сравнения на рис. 4 представлен результат работы алгоритма ДПФ в зависимости от размера временного окна при допущении, что основная частота сигнала уже определена и равна 50 Гц. При временном окне равном 6,25 мс получены следующие значения: $A_{1r} = 0,534$; $A_{2r} = 0,373$; $\varphi_r = 0,570$. Эти значения амплитуды частоты и фазы очень значительно расходятся с заданными параметрами сигнала. Сравнение рис. 3 и 4 очень наглядно демонстрирует преимущество ИНС: временное окно, необходимое для получения параметров сигнала, оказывается в три раза меньше, чем для ДПФ, даже без априорного задания частоты основной гармоники.

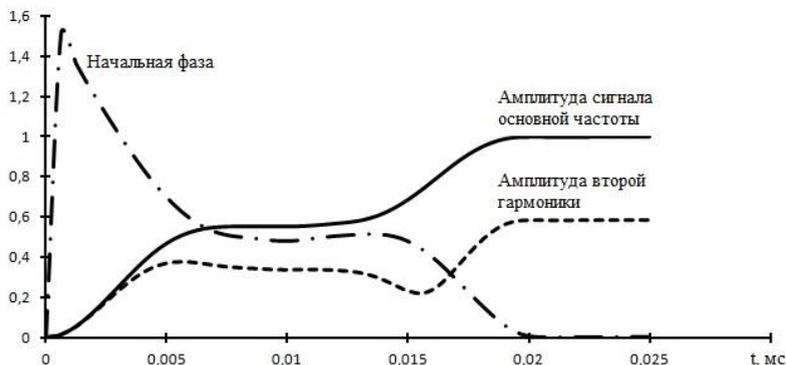


Рис. 4. Результат работы алгоритма ДПФ по мере попадания сигнала в окно 20 мс: сплошная – выделение амплитуды основной гармоники в составе входного сигнала, пунктир – выделение амплитуды второй гармоники в составе входного сигнала, точка-пунктир – выделение фазы основной гармоники

Выводы

Анализ работы предлагаемого нейросетевого алгоритма показал:

1. Для определения амплитуды и фазы сигнала основной частоты с точностью в единицы процентов от диапазона варьирования достаточно временного окна длительностью 3-5 мс.
2. Для определения частоты с точностью в доли герца требуется длительность окна близкая к половине периода.

3. Точность определения амплитуды второй гармоники существенно зависит от уровня высших гармоник. Если их уровень не превышает одного процента от амплитуды сигнала основной частоты, то амплитуда второй гармоники определяется с точностью, близкой к точности определения амплитуды основного сигнала [12].

Таким образом, нейросетевые алгоритмы могут эффективно использоваться для оценки параметров сигнала тока во вторичных цепях распределительных сетей за интервал времени, соответствующий даже менее чем трети периода сигнала промышленной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keerthipala W. Artificial neural network model for analysis of power system harmonics / Keerthipala W., Chong L.T. and Leong T.C. // IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 2, pp. 905–910.

2. Mazumdar J. Neural Network Based Method for Predicting Nonlinear Load Harmonics / Mazumdar J., Harley R.G., Lambert F. and Venayagamoorthy G. // Power Electronics, IEEE Transactions, 2007, vol. 22(3), pp. 1036–1045. doi: 10.1109/TPEL.2007.8971109.

3. Славутский А.Л. Применение алгоритма Доммеля для моделирования цепи с полупроводниковыми элементами и ключами с ШИМ управлением / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2014. – №2. – С. 57–65.

4. Славутский А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 122–130.

5. Кужеков С.Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока / С.Л. Кужеков, Г.С. Нудельман // Электромеханика. – 2009. – №4. – С. 12–17.

6. Antonov V.I. Adaptive Structural Analysis of Input Signals of Digital and Relay Protection and Automation / Antonov V.I., Naumov V.A., Fomin A.I. and Soldatov A.V. // ISSN 10683712, Russian Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, No. 7, pp. 391–397. doi: 10.3103/S1068371215070032.

7. Bychkov A.V. Neural Network for Pulsed Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment / Bychkov A.V., Slavutskii L.A. and

Slavutskaya E.V. // 2020 Int. Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 8936. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248.

8. Сучков В.О. Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока на основе искусственной нейронной сети / В.О Сучков, О.Н. Ядарова, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 207–212.

9. Laruhin A. Anomalous modes recognizing secondary equipment in electric power industry: adaptive neuro algorithms / A. Laruhin, M. Nikandrov, L. Slavutskii // 2019 International Ural conference on electrical power engineering: Proceedings URALCON 2019. – С. 399–403.

10. Кошечев М.И. Элементарный персептрон как инструмент анализа переходных процессов / М.И. Кошечев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 84–93.

11. Кошечев М.И. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кошечев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

12. Славутский А.Л. Нейросетевой алгоритм восстановления в реальном времени сигнала промышленной частоты при нелинейных искажениях. Славутский А.Л., Славутский Л.А., Алексеев В.В., Дмитренко А.М., Тутаев Г.М. Электротехника. 2021. № 8. С. 21–25.

Авторы:

Андреев Олег Николаевич, аспирант Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета в 2011 году. E-mail: helg013@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТРОЙКИ КОМПЕНСАЦИИ ЁМКОСТНОГО ТОКА

Иванов В.А., Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В данной работе оценивается влияние паразитных параметров КНП сети на величину расстройки компенсации ёмкостного тока. Реализована имитационная модель КНП сети, описывающая переходный процесс. На основе решения оптимизационной задачи рассчитываются параметры переходного процесса. Построен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.*

***Ключевые слова:** компенсация ёмкостного тока, контур нулевой последовательности, паразитные параметры, расстройка компенсации ёмкостного тока.*

Распределительные сети напряжением 6-35 кВ работают с изолированной от земли нейтралью. Данная особенность построения сетей сохраняет возможность их работы в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. Однако, со временем величина тока ОЗЗ возрастает, что приводит к возникновению электрической дуги в месте замыкания. Это вызывает необходимость компенсации токов однофазного замыкания на землю.

На практике компенсация токов ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью заключается в заземлении нейтрали сети через дугогасящий реактор (ДГР) [2]. Индуктивность ДГР подбирается таким образом, чтобы в контуре, образованном этой индуктивностью и суммарной емкостью фаз сети на землю, образовывался резонанс на промышленной частоте [3].

Степень компенсации ёмкостного тока ОЗЗ оценивается величиной, называемой расстройкой компенсации:

$$\vartheta = \frac{I_C - I_L}{I_C} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где I_c – емкостный ток сети, I_L – индуктивный компенсирующий ток ДГР. Устройства управления автоматикой должно поддерживать уровень расстройки равный нулю. По существующим требованиям [4] погрешность обеспечения требуемого тока ДГР не должна превышать 1 %, то есть ошибка определения величины расстройки не должна быть более 1 %.

Однако, на практике пользоваться формулой (1) для расчета расстройки не предоставляется возможным, так как невозможно точно измерить величину емкостного тока ОЗЗ. Поэтому применяют специальные способы определения расстройки компенсации, одним из которых является импульсный способ [5].

Импульсный способ основан на подключении в КНП сети источника возмущения через измерительную обмотку ДГР и оценки реакции КНП на это возмущение. В качестве источника возмущения выступает источник электродвижущей силы. Сгенерированное возмущение вызывает в КНП переходный процесс обмена энергией между индуктивностью ДГР и ёмкостью сети. После окончания переходного процесса оцениваются частота и коэффициент затухания свободных колебаний, которые определены параметрами контура нулевой последовательности и не зависят от причин, вызвавших эти колебания [5]. Величина расстройки в данном случае определяется следующим образом:

$$\vartheta = \left(1 - \frac{\omega_{св}^2 + \delta^2}{\omega_{сети}^2} \right) \cdot 100\% , \quad (2)$$

где $\omega_{сети}$ – промышленная частота сети, δ – коэффициент затухания переходного процесса, $\omega_{св}$ – частота свободных колебаний переходного процесса.

В работах [5, 6], в которых рассматривался импульсный метод определения расстройки компенсации, использовались идеализированные схемы замещения КНП, не учитывающие паразитные параметры. В связи с этим, в данной работе проводится анализ влияния паразитных параметров КНП на величину расстройки компенсации емкостного тока.

На рис. 1 изображена схема замещения КНП с учетом паразитных параметров.

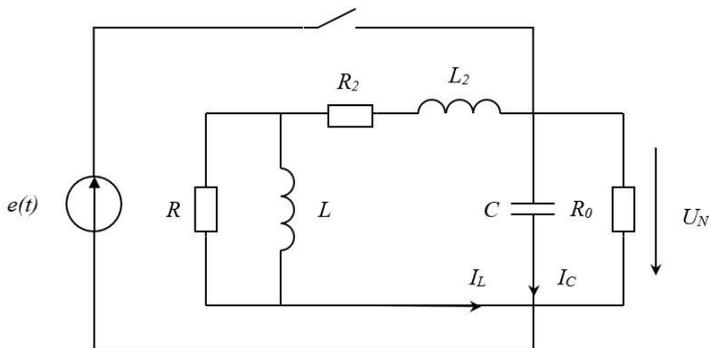


Рис. 1. Схема замещения КНП сети: $e(t)$ – источник внешнего воздействия, L_2, R_2 – индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмоток реактора, L, R – индуктивность намагничивания и сопротивление, соответствующее потерям в магнитопроводе, C – ёмкость сети относительно земли, R_0 – сопротивление изоляции относительно земли

Измеряемое напряжение переходного процесса описывается выражением (3):

$$u(t) = U \cdot \sin(\omega_{\text{св}}t + \varphi) \cdot e^{-\delta t}, \quad (3)$$

где U – амплитуда измеряемого напряжения, $\omega_{\text{св}}$ – частота свободных колебаний переходного процесса, δ – коэффициент затухания переходного процесса, φ – начальная фаза колебаний.

Поиск параметров переходного процесса, осуществляется посредством решения оптимизационной задачи (4) по методу наименьших квадратов [5].

$$\sum_{i=0}^n \left(u(t_i) - U \cdot \sin(\omega_{\text{св}}t_i + \varphi) \cdot e^{-\delta t_i} \right)^2 \rightarrow \min_m, \quad (4)$$

где n – количество доступных отсчетов; $\mathbf{m} = [U, \omega_{\text{св}}, \varphi, \delta]$ – вектор искомых параметров.

В данной работе начальное приближение параметров переходного процесса задается случайным образом. Диапазон изменения параметров представлен в табл. 1.

Таблица 1

Диапазон изменения параметров переходного процесса

Параметр	Диапазон изменения
U , В	5...30
$\omega_{св}$, рад/с	$40\pi \dots 200\pi$
φ , рад	0... 2π
δ , 1/с	5...100

В данной работе оценка величины расстройки компенсации ёмкостного тока осуществляется на основе имитационной модели КНП сети (рис. 1). Имитационная модель представляет собой функцию, на вход которой подаются параметры схемы замещения КНП сети (табл. 2). На выходе модели возвращаются действующие значения ёмкостного тока сети I_c , индуктивного тока ДГР I_L и вектор значений напряжения на нейтрали во время переходного процесса.

Таблица 2

Диапазоны значений параметров КНП сети

Параметр	Диапазон изменения
L Гн	0.005...0.8
R , Ом	1600...2400
L_2 , Гн	$10^{-4} \dots 10^{-2}$
R_2 , Ом	0.05...1.5
C , Ф	$10^{-5} \dots 10^{-4}$
R_0 , Ом	1500...2300

После расчета переходного процесса в соответствие с выражением (4) рассчитываются параметры переходного процесса. Затем по выражениям (1) и (2) вычисляются значения расстройки компенсации.

Для наглядной оценки влияния паразитных параметров на величину расстройки компенсации на координатной плоскости по оси абсцисс отложены значения величины расстройки компенсации, рассчитанные через параметры переходного процесса (2), а по оси ординат отложена разность величин расстроек, рассчитанных по выражениям (1) и (2). Также на координатной плоскости изображены допустимые отклонения расстройки: $\pm 1\%$.

В ходе исследования в соответствии с выражением (3) было сгенерировано 500000 переходных процессов. На рис. 2 представлен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.

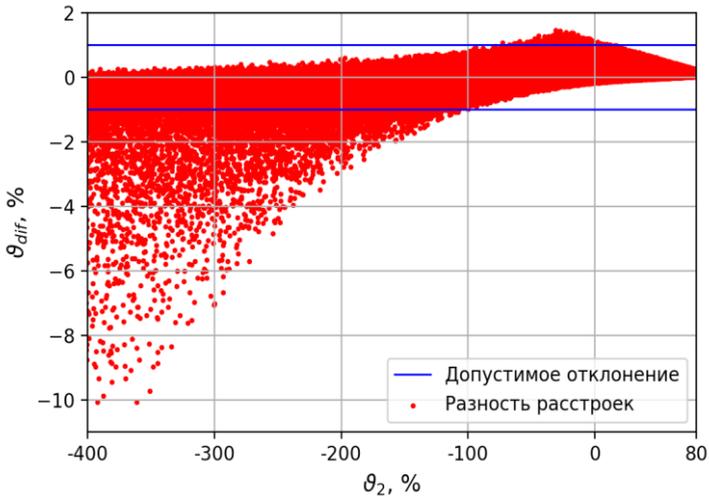


Рис. 1. График полученной зависимости, где ϑ_2 – расстройка, рассчитанная по формуле (2), $\vartheta_{diff} = \vartheta_2 - \vartheta_1$ – разность расстроек, ϑ_1 – расстройка, рассчитанная по формуле (1) (истинная расстройка)

Из рис. 2 видно, что разность расстроек выходит за пределы допустимых отклонений. Можно сделать вывод, что наличие паразитных параметров в КНП сети затрудняет получение верной оценки величины расстройки компенсации.

Выводы

1. Реализована имитационная модель КНП распределительной сети с учётом паразитных параметров, описывающая переходный процесс.

2. Построен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.

3. Игнорирование паразитных параметров в КНП вносит ошибку определения величины расстройки, поэтому для повышения точности определения необходимо учитывать паразитные параметры в КНП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементий Ю.А. Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях: дис. ... канд. техн. наук. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, 2018 – 120 с.

2. Вайнштейн Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учеб. пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 108 с.

3. Соловьёв И.В. Совершенствование управления компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, 2014 – 226 с.

4. СТО 34.01-3.2-008-2017. Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35кВ. Общие технические требования: стандарт организации: дата введения 28.02.2017 / Публичное акционерное общество «Российские сети».

5. Дементий Ю. А. Элементы искусственного интеллекта в управлении компенсацией емкостного тока однофазного замыкания на землю / Ю. А. Дементий // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 38-43.

6. Козлов В.Н. О способах выполнения автоматики управления ДГР / В.Н. Козлов, М.И. Петров, И.В. Соловьёв // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 14-19.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com

Иванов Василий Александрович, студент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашияского государственного университета им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: ivanov.vasili.alek@gmail.com

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Золотов А.А., Петряшин И.Е., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В работе анализируется возможность распознавания структуры сигнала с помощью методов машинного обучения, в частности нейронных сетей. Рассмотрены базовые принципы построения нейронных сетей. Предложена архитектура нейронной сети, подходящая для классификации сигналов.*

***Ключевые слова:** нейронная сеть, структурный анализ.*

Введение

В последнее время в энергетике получили распространение методы машинного обучения и нейронных сетей [1]. Распространяя методы машинного обучения на структурный анализ [2,3] можно добиться более эффективного применения алгоритмов защит за счет интеграции алгоритмов распознавания сигнала и алгоритма работы защиты.

В микропроцессорных защитах основным инструментом цифровой обработки сигналов является дискретный фильтр Фурье, который позволяет с достаточной точностью определить уровень той или иной гармоники. Однако, данный способ имеет ряд недостатков, например, большую погрешность при отклонении частоты сигнала от номинальной частоты фильтра Фурье или при наличии в исходном сигнале аперiodической составляющей.

Целью данной работы является оценка возможности цифровой обработки сигналов с помощью нейронных сетей. В частности, рассматривается задача определения структуры сигнала.

Задача определения структуры сигнала рассматривается как задача классификации, и количество классов равно количеству видов генерируемых сигналов.

Описание нейронной сети

Под искусственным нейроном понимается математическая модель естественного нейрона, содержащая функцию активации. Совокупность нейронов и связей между ними (синапсов) представляет собой нейронную сеть. Следует отметить, что

каждый синапс имеет свой весовой коэффициент, который «усиливает» значение на входе нейрона.

Наиболее распространенной архитектурой нейронной сети является полносвязная. Ее условная схема представлена на рис. 1. Здесь X – входной слой, H – скрытый слой, Y – выходной слой, w_{ij} – весовой коэффициент синапса.

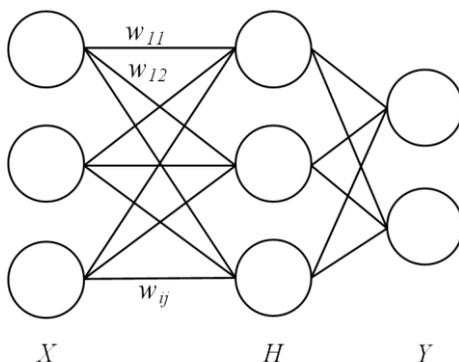


Рис. 1. Условная схема нейронной сети

Для обучения нейронной сети необходима обучающая выборка, представляющая собой совокупность векторов признаков и векторов ответов.

Обучение нейронной сети представляет собой подбор весовых коэффициентов синапсов таким образом, чтобы суммарная разница между векторами на выходе нейронной сети и соответствующими значениями векторов ответов была минимальна.

Базовым методом определения весовых коэффициентов является метод обратного распространения ошибки (backpropagation) [4].

Генерация обучающей выборки

Для корректного обучения нейронной сети необходимо иметь репрезентативную обучающую выборку. Важно, чтобы размер обучающих выборок, относящихся к разным классам, был одинаковым.

Так как основной целью данной работы является оценка возможности использования нейронной сети для структурного

анализа электрических сигналов, обучающая выборка генерировалась на основе наиболее встречающихся сигналов:

- синусоида основной гармоники: отражает нормальный установившейся режим;
- синусоида основной гармоники с присутствием аперидической составляющей: отражает переходный процесс;
- синусоида основной гармоники с содержанием третьей гармоники: отражает процессы в системах, содержащих нелинейные элементы;
- синусоида основной гармоники с содержанием аперидической составляющей и составляющей третьей гармоники: отражает переходные процессы в цепях с нелинейными элементами;
- затухающая синусоида основной гармоники: отражает свободные затухающие процессы.

Для каждого вида сигнала генерируется вектор ответов. Рассматриваемым сигналам соответствуют следующие векторы ответов: $[1; 0; 0; 0; 0]$, $[0; 1; 0; 0; 0]$, $[0; 0; 1; 0; 0]$, $[0; 0; 0; 1; 0]$, $[0; 0; 0; 0; 1]$.

Обучающая выборка включает в себя по 100000 сигналов каждого вида. Генерация параметров сигналов выполняется случайным образом. Аналогичным образом формируется тестовая выборка.

Архитектура используемой нейронной сети

Для решения поставленной задачи была принята архитектура нейронной сети, соответствующая рис 1. Она имеет один входной слой, содержащий 12 нейронов, что соответствует отсчетам сигнала; скрытый слой, содержащий 12 нейронов; выходной слой, содержащий 5 нейронов, соответствующих каждому из рассматриваемых классов.

Для нейронов скрытого слоя была выбрана функция активации ReLu. Для нейронов выходного слоя функцией активации является Softmax. Данная функция нормирует вектор ответов таким образом, чтобы сумма элементов вектора ответов была равна единице. С указанной функцией активации оптимально применять такую функцию потерь как категориальная кроссэнтропия (categorical crossentropy). В качестве оптимизатора нейронной сети был принят алгоритм AdaDelta, который меняет

шаг обучения в зависимости от значения градиента на последних эпохах обучения.

Обучение происходило 1000 эпох, размер батча (batch size) равен 1000.

На обучающей выборке процент правильно распознанных сигналов получился 99,14. На тестовой выборке процент правильно распознанных сигналов 99,07.

Ошибка связана с достаточно простой архитектурой нейронной сети. Также свой вклад в ошибку вносит случайный принцип формирования обучающей выборки.

Вывод

Задача определения структуры сигнала рассмотрена как задача классификации. Для ее решения предложена нейросетевая архитектура.

Случайный принцип формирования обучающей выборки не позволяет репрезентативно описать сигналы, наблюдаемые в электроэнергетической системе. В дальнейших исследованиях целесообразно генерировать обучающую выборку с равномерно заполняющими пространство параметров сигналами.

Результаты анализа показали, что нейронные сети способны с высокой точностью классифицировать сигналы, свойственные электроэнергетической системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Степанова Д.А.* Задачи классификации и глубокого обучения в релейной защите цифровой электроэнергетики / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов : Материалы конференции в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2019, Чебоксары, 23–26 апреля 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 116–122.

2. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – 334 с. – ISBN 9785767725717.

3. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №2. – С. 18–28.

4. Shekhar S., Xiong H. Artificial Neural Network. In: Shekhar S., Xiong H. (eds) Encyclopedia of GIS. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_72.

Авторы:

Золотов Александр Артурович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 году факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.

Петряшин Илья Евгеньевич, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», студент 4 курса бакалавриата ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: petryashin.i.e@mail.ru.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕКТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И КРИВОЙ АБСОЛЮТНОЙ НЕРАСПОЗНАВАЕМОСТИ ЗАЩИЩАЕМОГО ОБЪЕКТА

Дементий Ю.А., Иванов В.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В данной работе предложен метод построения объектной характеристики релейной защиты и кривой абсолютной нераспознаваемости защищаемого объекта, основанный на решении оптимизационной задачи. Составлена оптимизируемая функция, основанная на определении явления абсолютной нераспознаваемости. Приведён пример построена кривой абсолютной нераспознаваемости воздушной линии электропередач с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны.

Ключевые слова: релейная защита, объектная характеристика, кривая абсолютной нераспознаваемости, оптимизируемая функция.

Селективность и чувствительность являются важными свойствами релейной защиты. Под селективностью релейной защиты понимается её способность срабатывать при коротких замыканиях в пределах защищаемой зоны (α -режимы) и не сра-

батывать при коротких замыканиях вне защищаемой зоны и нормальных режимах (β -режимы) [1].

Одним из методов оценки чувствительности релейной защиты является характеристика чувствительности к переходному сопротивлению (объектная характеристика).

Работы [1, 2, 3], в которых упоминается объектная характеристика не содержат описания метода её построения. Поэтому в данной работе представлен метод построения объектной характеристики, а также кривой абсолютной нераспознаваемости, которая отражает физический предел распознавания контролируемых режимов в рассматриваемом объекте.

Описание метода построения

Согласно информационной теории релейной защиты одним из источников информации о режимах работы является имитационная модель объекта [3]. Модель принимает на вход m -мерный вектор объектных параметров $\mathbf{x} \in G$ и возвращает вектор значений наблюдаемой величины (замер) $\mathbf{v} \in S$, где G – область определения имитационной модели, где S – образ отображения F (уставочная область), F – преобразование, объединяющее функцию имитационной модели и функцию замера.

Конкретный режим задается вектором \mathbf{x}_α или вектором \mathbf{x}_β объектных параметров. Преобразование векторов \mathbf{x}_α и \mathbf{x}_β в вектора \mathbf{v}_α и \mathbf{v}_β осуществляется преобразованиями F_α и F_β :

$$\mathbf{v}_\alpha = F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha), \mathbf{v}_\beta = F_\beta(\mathbf{x}_\beta).$$

Преобразования F_α и F_β отображают области G_α и G_β в уставочные области $S_\alpha = F_\alpha(G_\alpha)$ и $S_\beta = F_\beta(G_\beta)$ [4]. В общем случае уставочные области S_α и S_β могут пересекаться. Поскольку в области пересечения нельзя точно установить к какому режиму относится замер, во всех режимах, замеры которых расположены в области пересечения, защите запрещено срабатывать. Так, пересечение образов отображений α - и β -режимов приводит к явлению абсолютной нераспознаваемости, математическое определение которого выглядит следующим образом:

$$F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha) = F_\beta(\mathbf{x}_\beta), \quad (1)$$

Область S_α можно условно разделить на область срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ и область пересечения $S_{\alpha\beta}$. Преобразами уставочных об-

ластей $S_{\alpha\alpha}$ и $S_{\alpha\beta}$ в объектном пространстве являются области $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$. Проекция области $G_{\alpha\alpha}$ на плоскость $x_{f\alpha}$, $R_{f\alpha}$ окаймляется кривой абсолютной нераспознаваемости. Таким образом, кривая абсолютной нераспознаваемости является граничной линией между проекциями областей $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$ на плоскость $x_{f\alpha}$, $R_{f\alpha}$.

Кривая абсолютной нераспознаваемости представляет собой зависимость предельного значения переходного сопротивления $R_{f\alpha}$, до которого распознавание теоретически возможно, от координаты места замыкания $x_{f\alpha}$. Построение кривой нераспознаваемости осуществляет процедура минимизации

$$R_{f\alpha}(x_{f\alpha}) = \min_{x_{norm} \in G_{\alpha}} R_{f\alpha}(x_{f\alpha}, \mathbf{x}_{norm}), \quad (2)$$

где \mathbf{x}_{norm} – вектор нормальных объектных параметров.

Объектная характеристика представляет собой зависимость минимального переходного сопротивления $R_{f\alpha}$, которое гарантированно может распознать орган РЗ, от координаты места замыкания $x_{f\alpha}$ [1]. Построение объектной характеристики осуществляет процедура минимизации (2) при выполнении условия срабатывания защиты.

В данной работе объектная характеристика и кривая абсолютной нераспознаваемости представляют собой набор точек с фиксированным параметром $x_{f\alpha}$, для которых осуществляется поиск оптимальных значений $R_{f\alpha}$. Для их построения необходимо разграничить области $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$. На основании математического определения абсолютной нераспознаваемости (1) решением такой задачи будет являться результат минимизации нормы разности векторов замеров:

$$\left| F_{\alpha}(\mathbf{x}_{\alpha}) - F_{\beta}(\mathbf{x}_{\beta}) \right| \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{x}_{\alpha} \in G_{\alpha} \\ \mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta}}}, \quad (3)$$

Необходимо отметить, что условие (3) будет выполняться как для граничных режимов, так и для тех режимов, что расположены внутри области $G_{\alpha\beta}$, что является нежелательным. Поэтому задачу оптимизации необходимо изменить, добавив дополнительное требование к условию (3), ограничивающее выполнение решения в области нераспознаваемости. В качестве дополнительного требования к задаче служит минимизация переходного сопротивления α -режима:

$$R_{f\alpha} \rightarrow \min_{\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha}, \quad (4)$$

На основании условий (3) и (4) составляется оптимизируемая функция. Однако величины, фигурирующие в задаче, могут отличаться друг от друга на несколько порядков.

Для равномерного влияния условий (3) и (4) на процедуру оптимизации к условию (3) добавляется дополнительное ограничение в виде гиперпараметра λ [5]. Чтобы добиться равномерного влияния условий на процедуру оптимизации необходимо подобрать гиперпараметр. В результате, оптимизируемая функция выглядит следующим образом:

$$f([\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta]) = \lambda |F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha) - F_\beta(\mathbf{x}_\beta)| + R_{f\alpha}, \quad (5)$$

где λ – параметр регуляризации.

Таким образом, решением задачи построения кривой абсолютной нераспознаваемости является минимизация функции (5):

$$f([\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta]) \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha \\ \mathbf{x}_\beta \in G_\beta}}, \quad (6)$$

Так как объектная характеристика – это характеристика защиты, то для её построения недостаточно наличия только условия (6), необходимо также указать условие срабатывания защиты:

$$TC = True, \quad (7)$$

где TC – trigger condition (условие срабатывания).

Следовательно, решением задачи построения объектной характеристики является минимизация функции (5) при выполнении условия срабатывания защиты (7):

$$f([\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta] | TC = True) \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha \\ \mathbf{x}_\beta \in G_\beta}}, \quad (8)$$

В данной работе применяется градиентный метод оптимизации, одним из требований которого является задание начального приближения параметров оптимизации. Для поиска глобального минимума функции необходимо задать начальное приближение параметров таким образом, чтобы оно не оказалось в окрестности локального минимума.

На основании вышеизложенного, требованием данного метода построения является задание начального приближения объектных параметров.

Поиск оптимальных значений объектных параметров имеет итеративный характер. В первую очередь формируется начальное приближение объектных параметров для α - и β - режимов в виде конкатенированного вектора:

$$\mathbf{x}_{concat} = [\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta].$$

При этом конкатенированный вектор содержит константное значение параметра x_{fa} , которое не изменяется во время процедуры оптимизации. Оптимизация происходит до тех пор, пока не будет выполнено условие (6) для построения кривой абсолютной нераспознаваемости, или условие (8) для построения объектной характеристики. После получения оптимальных значений объектных параметров отбирается значение параметра R_{fa} .

Затем описанный процесс повторяется снова для равномерно разнесённых значений x_{fa} , взятых с определённым шагом. После получения оптимальных значений параметров R_{fa} строится объектная характеристика или кривая абсолютной нераспознаваемости.

Построение кривой абсолютной нераспознаваемости

На рис. 1 приведена модель воздушной линии с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны, в режиме трехфазного короткого замыкания.

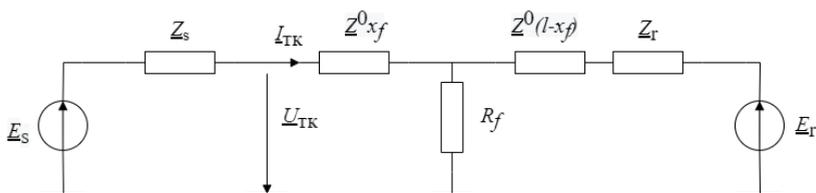


Рис. 1. Схема замещения воздушной линии электропередач

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения фиксированных и варьируемых объектных параметров модели.

В качестве замера для данной модели выбрана величина проводимости:

$$\underline{Y} = \underline{I}_{TK} / \underline{U}_{TK}.$$

В таком случае двухмерный вектор проводимости представлен на комплексной плоскости:

$$\mathbf{y} = [\text{Real}(\underline{Y}), \text{Imag}(\underline{Y})].$$

Таблица 2

Фиксированные параметры защищаемого объекта

Фиксированные параметры	Обозначение параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	U	110
Удельное сопротивление линии, Ом/км	\underline{Z}^0	$0.1+j0.4$
Длина линии, км	l	100
Длина защищаемой зоны, км	x_z	80

Таблица 3

Варьируемые параметры защищаемого объекта

Варьируемые параметры	Обозначение параметра	Диапазон изменения параметра
Угол передачи, град	δ	-30...30
Модуль сопротивления систем, Ом	Z_s, Z_r	0.1...100
Аргумент сопротивления систем, град	$arg(Z_s), arg(Z_r)$	80...90
Переходное сопротивление, Ом	R_f	0...1e4
Расстояние до места повреждения, км	x_f	0...100

На рис. 2 приведена кривая абсолютной нераспознаваемости защищаемого объекта (рис. 1).

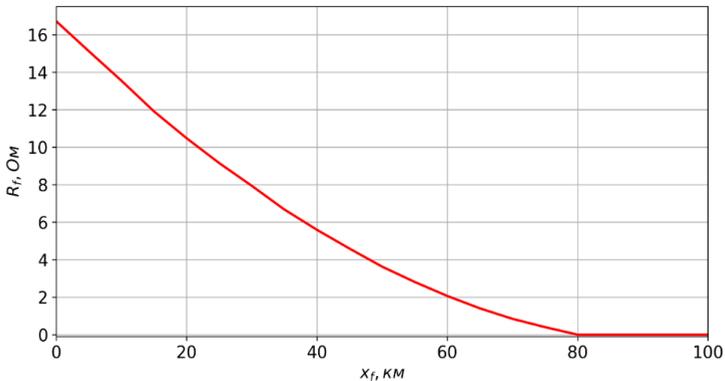


Рис. 2. Кривая абсолютной нераспознаваемости

Выводы

1. Предложен метод построения кривой абсолютной нераспознаваемости и объектной характеристики, основанный на решении оптимизационной задачи.

2. Предлагаемый метод применен для построения кривой абсолютной нераспознаваемости воздушной линии электропередачи с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартынов М.В.* Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2014.

2. *Романов Ю.В.* Проблема оценки чувствительности релейной защиты / Ю.В. Романов, П.И. Воронов // Электрические станции. – 2017. – № 10(1035). – С. 38-41.

3. *Лямец Ю.Я.* Граничные задачи в информационной теории релейной защиты / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов [и др.] // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 13-18.

4. *Лямец Ю.Я.* Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. граничные условия и обучающие процедуры / Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 24-30.

5. *Wolpert, D.H., Macready, W.G.* No Free Lunch Theorems for Optimization // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, – 1997 – p. 67-82.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiу.уi.a@gmail.com.

Иванов Василий Александрович, студент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: ivanov.vasili.alek@gmail.com.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК АКТИВНО-АДАПТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Пилюгин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация: В работе решается задача моделирования синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия, и исследуются адаптивные свойства с целью разработки структур и алгоритмов оптимального управления состоянием синхронного двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель, активно-адаптивный элемент, система электроснабжения, реактивная мощность, ток, напряжение.

Согласно основным положениям концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, представляющую собой совокупность подключенным к генерирующим источником и потребителям электроэнергии элементов электрических сетей и систем управления, включает в себя устройства электромагнитного преобразования электроэнергии с широкими возможностями регулирования параметров (напряжения, реактивной мощности, потерь электроэнергии) [1].

Система электроснабжения промышленного предприятия (СЭПП) является частью (подсистемой) энергосистемы. Входящие в ее состав активно-адаптивные элементы, по аналогии с энергосистемой, являются синхронные двигатели (СД), которые участвуют в технологическом процессе предприятия и могут быть использованные как устройства компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в узлах электрических нагрузок.

СД представляет собой электромашинное устройства, работающее с постоянной частотой вращения зависящей от частоты питающей сети и количества пар полюсов. Генерация реактивной мощности зависит от нескольких управляющих воздействий, а именно регулирование тока возбуждения (ток ротора) и изменение напряжения питающей сети СД [2, 3].

Наибольший интерес для исследований представляют высоковольтные СД ввиду массового их использования на обогатительных фабриках и других промышленных предприятиях цветной металлургии, где установленная мощность СД составляет 30 – 60 % от установленной мощности всех электроприемников.

Для моделирования СД как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия воспользуемся математическими моделями и методами расчета, представленными в работе коллектива авторов под руководством Пантелеева В.И. [4]. В данной работе представлены математические выражения, описывающие взаимосвязь между реактивной мощностью и током статора от тока возбуждения, напряжения статора и моментом сопротивления на валу СД, учитывающие явполносность ротора и изменение насыщения магнитной цепи при использовании минимального количества исходных данных.

Как правило, в системах электроснабжения промышленных предприятий цветной металлургии, эксплуатируются тихоходные СД, частота вращения которых составляет до 600 об/мин и ротор которых имеет ярко выраженные полюса. Не учет этого фактора оказывает существенное влияние на результаты моделирования [4].

Задача моделирования СД как активно-адаптивного элемента подразумевает исследования его адаптивных свойств и выявления закономерностей, при различных вариациях управляющих воздействий. Наиболее простым методом для решения поставленной задачи является метод планирования вычислительного эксперимента. Данный метод позволяет произвести полный факторный эксперимент, в котором уровни каждого фактора (управляющее воздействие) комбинируются со всеми уровнями других факторов [5]. Модель СД как объекта исследования представлена на рис. 1.

Моделирование произведем в несколько этапов:

1. Этап планирования эксперимента.

Для удобства использования математических моделей приведем параметры СД к относительным единицам и воспользуемся исходными данными, приведёнными в [4]. План эксперимента включает: 3 фактора (ток возбуждения I_2 , напряжение

статора U_1 , момент сопротивления на валу M), задаются в относительных единицах; 1 отклик (реактивная мощность Q) и 5 уровней фактора.

2. Этап моделирования.

Результаты моделирования состояний СД сведены в таблице.

Таблица

Результаты моделирования состояний СД

№ опыта	M , о. е	I_2 , о. е	U_1 , о. е	Q , квар
1	0,7	0,4	0,9	-626,14
2			0,95	-738,05
3			1	-870,06
4			1,05	-1023,06
5			1,1	-1198,2
6		0,6	0,9	-128,83
7			0,95	-233,1
8			1	-357,62
9			1,05	-503,69
10			1,1	-672,78
11		0,8	0,9	320,43
12			0,95	226,4
13			1	110,86
14			1,05	-27,65
15			1,1	-190,72
16		1	0,9	741,34
17			0,95	657,07
18			1	549,71
19			1,05	417,7
20			1,1	259,38
21		1,2	0,9	1139,38
22			0,95	1063,63
23			1	963,07
24			1,05	836,07
25			1,1	680,94

3. Этап визуализации полученных результатов.

На рис. 2 и рис. 3 представлены графические зависимости реактивной мощности Q от напряжения статора U_1 , при различных значениях тока возбуждения I_2 и от тока возбуждения I_2 , при различных значениях напряжения статора U_1 соответственно.

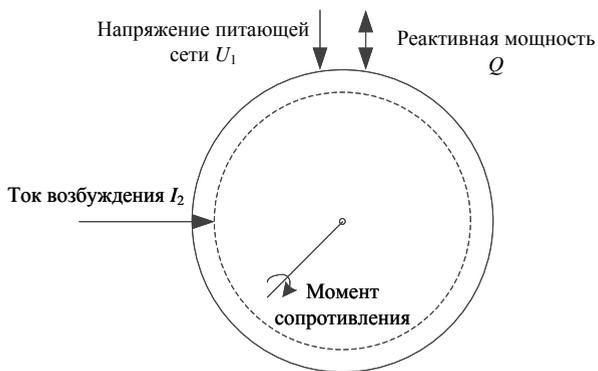


Рис. 1. Модель СД как объекта исследования

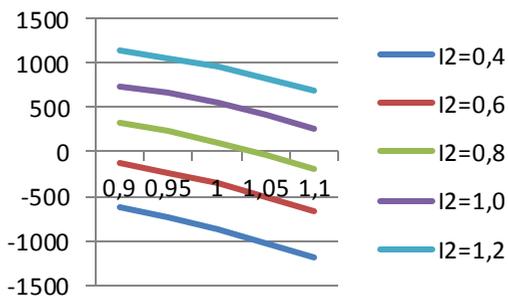


Рис. 2. Зависимости Q от U_1

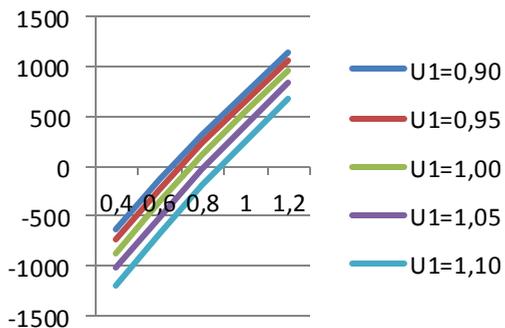


Рис. 3. Зависимости Q от I_2

Выводы

В результате моделирования СД как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия были исследованы адаптивные свойства. Результатом моделирования являются графические модели, описывающие зависимости реактивной мощности от различных управляющих воздействия и могут быть использованы для разработки структур и алгоритмов систем оптимального управления состоянием СД. На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод, что изменение генерации реактивной мощности является достаточным существенным при изменении питающего напряжения. Такой разброс величины реактивной мощности в пределах предельно допустимых значений напряжений говорит о том, что при моделировании состояний систем электроснабжения с синхронными двигателя необходимо учитывать адаптивные свойства СД, т. к. это оказывает существенное влияние на режим по реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Россети ФСК ЕЭС [Электронный ресурс]: Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

3. Вершинин П.П., Хащпер Л.Я. Применение синхронных электроприводов в металлургии. М.: Металлургия, 1974. 272 с.

4. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 6. С. 795-801.

5. Колюхов В.М., Чекалин А.Н., Колюхов И.В. Численное моделирование и метод планирования вычислительных экспериментов: учебно-методическое пособие. Казань, 2016. 30 с.

Авторы:

Пилюгин Геннадий Александрович, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Политехнический институт Сибир-

ский федеральный университет. Закончил в 2014 году факультет энергетики Политехнического института Сибирского федерального университета. E-mail: sfu_pi_pilyugin@mail.ru.

Пантелеев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетика», Политехнический институт Сибирский федеральный университет. Закончил в 1970 году факультет автоматических систем Томского политехнического института. Учёная степень кандидата технических наук в 1973 году, доктора технических наук в 1994 году по теме «Электроприводы переменного тока в прецизионных следящих системах». E-mail: pvi0808@rambler.ru.

Филатов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика», Политехнический институт Сибирский федеральный университет. Закончил в 1985 году электромеханический факультет Красноярского Политехнического института. Учёная степень кандидата технических наук в 1997 году по теме «Управление режимом реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия». E-mail: anf24@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОВ ПРИБОРОВ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ TALGAT

Иванов В.Н., Михайлов А.Л., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы экранирования корпусов приборов и их моделирование в программной среде TALGAT.*

***Ключевые слова:** экранирование; программная среда TALGAT.*

Одним из критериев электромагнитной совместимости (ЭМС) является внешняя помехозащищенность электронного устройства [1] – его способность препятствовать проникновению в тракт радиопомех через его корпус и по цепям питания. Применительно к системам релейной защиты и автоматики (РЗА) задачи по их обеспечению стойкости к внешним радиоизлучениям стоят особенно остро [2, 3].

Для обеспечения ЭМС широко используется электромагнитное экранирование, позволяющее снизить восприимчивость

чувствительных электрических цепей, узлов и блоков РЗА к излучаемым электромагнитным помехам.

Технологические отверстия всегда присутствуют в корпусах приборов, через которые проходят электромагнитные помехи внутрь устройств. В связи с этим возникает проблема ЭМС при разработке корпусов приборов, связанная с возможностью правильного выбора места размещения технологических отверстий [4].

В последнее время появляется большое количество программного обеспечения, позволяющее решать вопросы связанные с ЭМС. Одной из таких программ является TALGAT [5]. Удобной особенностью данной программы является наличие в этой программе модуля 3D SE BOX, который позволяет моделировать корпуса прямоугольной формы и в форме цилиндра (рис. 1).

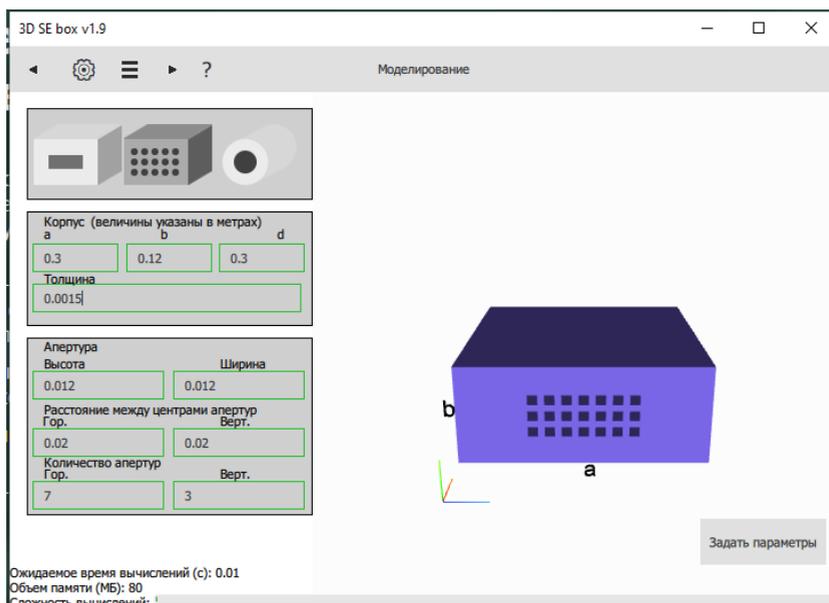


Рис. 1.

Программа позволяет рассчитать эффективность экранирования, выраженную в децибелах, внутри корпуса. Можно задать

одно отверстие или группу отверстий в корпусе прибора. Экранирование оценивается относительно внешней плоской электромагнитной волны.

Для примера был проведен расчет для прямоугольного корпуса с размерами $0,5 \text{ м} \times 0,2 \text{ м} \times 0,3 \text{ м}$ и толщиной стенок $0,0005 \text{ м}$. Апертура измерительного приемника располагается в точке $x=0,15 \text{ м}$, $y=0,06 \text{ м}$ с размерами $0,012 \text{ м} \times 0,1 \text{ м}$. Расчеты проводились в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц . Результаты расчетов представлены на рис. 2. Здесь, по оси x отложена частота в герцах, по оси y – точка наблюдения в метрах, по оси z – эффективность экранирования в децибелах. Если указать точку наблюдения на трехмерном графике, то можно построить зависимость эффективности экранирования от частоты в указанной точке (рис. 3).

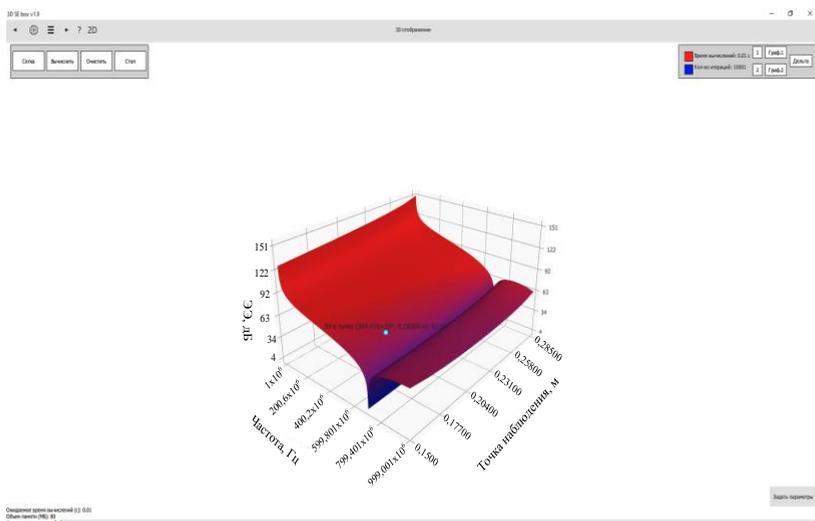


Рис. 2.

В программе применяется метод эквивалентной цепи [6]. Этот метод, для прямоугольного корпуса с одним отверстием на одной из стенок корпуса прибора, при падении плоской электромагнитной волны, представлен соотношением между амплитудами электрической и магнитной компонент плоской элек-

тромагнитной волны и законом Ома для участка цепи. Для падающей плоской электромагнитной волны с вертикальной поляризацией, ее источник заменяется ЭДС с амплитудой V_0 и внутренним сопротивлением Z_0 , равным волновому сопротивлению свободного пространства (120π Ом). Источник напряжения определяется формулой

$$V_{0\perp} = V_0 \sin(\varphi),$$

$$V_{0\parallel} = V_0 \cos(\varphi),$$

где $V_{0\perp}$, $V_{0\parallel}$ – напряжения источника, эквивалентные перпендикулярной и параллельной компонентам вектора напряженности электрического поля E , φ – угол между вектором E и осью y [4].

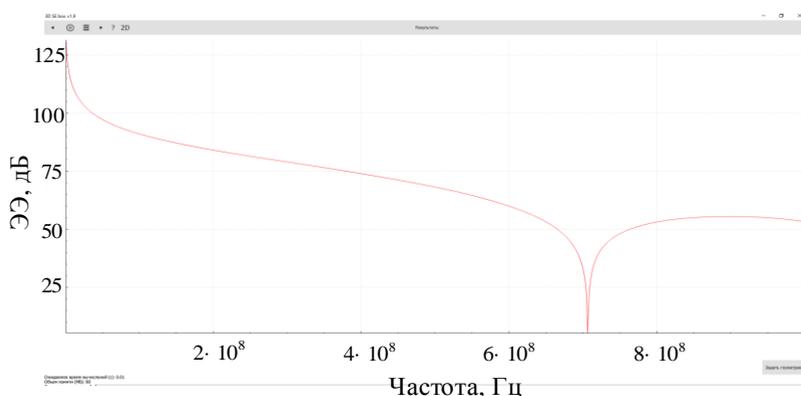


Рис. 3.

Из полученных графиков заметно, что распределение электромагнитной помехи внутри прибора имеет резонансный характер. На частоте 700 МГц при заданных параметрах экранирование равно 4 дБ, в то же время практически линейно уменьшается с 90 дБ до 56 дБ в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц. При этом эффективность экранирования практически не меняется от точки наблюдения.

Выводы

Программа TALGAT позволяет оценить эффективность экранирования внутри корпуса прибора, тем самым позволяет

проектировщику правильно оценить влияние внешних электромагнитных помех на элементы устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бадалов А.Л., Михайлов А.С.* Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.

2. *Ильин В.Ф., Ильин Н.В., Федоров Ю.А.* Исследовательские испытания ЭМС шкафа РЗА в части эмиссии и устойчивости к излучаемым помехам. Релейная защита и автоматизация. Научно-практическое издание. № 3(40)2020 г. С. 37–49.

3. *Иванов В.Н., Михайлов А.Л.* Моностатическое рассеяние от покрытий // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 401–402.

4. *Иванов А.А., Комнатнов М.Е.,* Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи. Системы управления, связи и безопасности №2, 2019, ISSN 2410-9916 – 111-142 с.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610712. TALGAT 2010 / Т.Р. Газизов, А.О. и др. Заявка № 2011617178. Дата поступления 26 сентября 2011 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2012 г.

6. *Thomas D.W.P. et al.* // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2001. – V. 43. – No. 2. – P. 161–169.

Авторы:

Иванов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и РТС, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил кафедру радиотехники и радиотехнических систем Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 1999 году. Получил ученую степень кандидата технических наук в 2005 году. E-mail: ivnik2003@mail.ru.

Михайлов Анатолий Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и РТС, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил радиотехнический факультет Казанского авиационного института им. А.Н. Туполева в 1983 г. Получил ученую степень кандидата физико-математических наук в 1991 году. E-mail: mal@nextmail.ru.

НОВЫЙ СПОСОБ ОДНОСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Фёдоров А.О., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Петров В.С., Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Ивахно Д.О., Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье предложен новый способ одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи, свободный от недостатка традиционных способов: необходимости распознавания волны, отраженной от места короткого замыкания. Это преимущество достигается путем непосредственного сравнения измеренного сигнала переходного процесса с его оценкой, найденной для предполагаемого места повреждения в модели электрической сети аварийного режима. Сравнение ведется с использованием алгоритма динамической трансформации временной шкалы, нивелирующей погрешности модели электрической сети аварийного режима. За место повреждения принимается предполагаемое место повреждения, оценка сигнала переходного процесса для которого идентична измеренному сигналу.*

***Ключевые слова:** одностороннее волновое определение места повреждения, динамическая трансформация временной шкалы.*

Введение

Сегодня методы волнового определения места повреждения линии электропередачи (ЛЭП) набирают всё большую популярность. Это связано с тем, что аварийный режим ими анализируется на невероятно коротком промежутке времени, в течение которого высоковольтные трансформаторы тока не успевают перейти в режим насыщения [1]. Это преимущество закладывает в односторонние волновые методы большой потенциал для прецизионной локализации повреждений на ЛЭП. Однако для реализации этого потенциала в сигнале переходного процесса необходимо правильно распознать две волны: первичную волну с контролируемой ЛЭП и волну, отраженную от повреждения [2]. Тогда расстояние до места повреждения можно определить по простой формуле

$$\hat{x}_f = \frac{t_{sw} - t_{fw}}{2} v, \quad (1)$$

где v – скорость распространения волны в ЛЭП, а t_{fw} и t_{sw} – моменты возникновения первичной волны с контролируемой ЛЭП и волны, отраженной от места повреждения.

Распознавание волны, отраженной от места повреждения, осложнено тем, что в течение переходного процесса в месте измерений возникает множество других волн, порожденных в результате отражений от различных неоднородностей электрической сети.

Целью настоящей работы является разработка способа одностороннего волнового определения места повреждения, свободного от недостатка традиционных подходов: необходимости распознавания волны, отраженной от места короткого замыкания.

Идея предлагаемого алгоритма

В предлагаемом способе в модели электрической сети аварийного режима оцениваются величины фронтов волн и моменты их возникновения в месте установки устройства для каждого предполагаемого места повреждения, и на их основе оценивается сигнал переходного процесса (рис. 1). Для упрощения расчетов в модели электрической сети аварийного режима не учитываются потери в ЛЭП. В связи с чем оценка сигнала несколько отличается от измеренного сигнала переходного процесса. Нивелировать указанное отличие предлагается при помощи алгоритма динамической трансформации временной шкалы, адаптивно сопоставляющего идентичные сегменты сравниваемых сигналов. Место повреждения при этом определяется по наиболее точному соответствию измеренного сигнала переходного процесса и его оценки.

Методика оценки величин фронтов волн и моментов их возникновения в месте установки устройства волнового ОМП подробно изложена в [2] – [4].

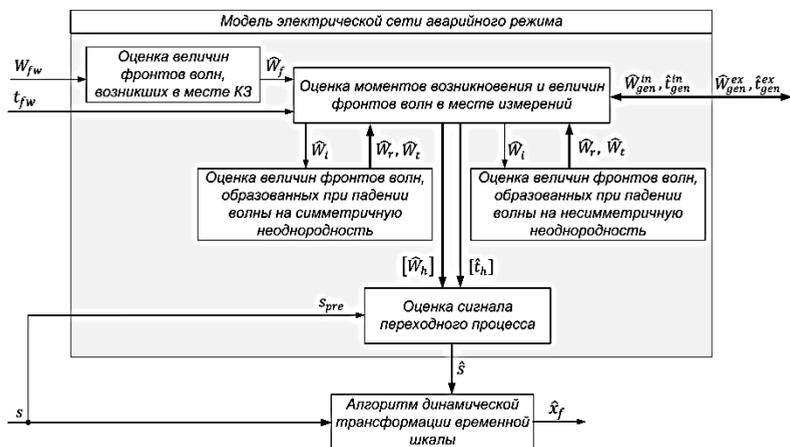


Рис. 1. Структурная схема¹ предлагаемого способа одностороннего волнового ОМП

Оценка сигнала переходного процесса

С помощью модели электрической сети аварийного режима формируют оценки величин фронтов волн $[\hat{W}_h]$ и моментов их возникновения $[\hat{t}_h]$ в месте установки устройства в течение удвоенного времени пробега T_w волной всей ЛЭП. На их основе и с использованием предаварийного мгновенного значения s_{pre} оценивается сигнал переходного процесса \hat{s} (рис. 2), который сравнивается с измерением устройства при помощи алгоритма динамической трансформации временной шкалы.

¹ На рис. 1 используются следующие обозначения: W_{fw} – величина фронта первичной измеренной волны с контролируемой ЛЭП, s_{pre} – предаварийное значение измеренного сигнала; \bar{W}_f – величина фронта волны, возникшей в месте КЗ, $\bar{W}_i, \bar{W}_r, \bar{W}_t$ – оценки величин фронтов падающей, отраженной и преломленной волн, $\bar{W}_{gen}^{ex}, \bar{W}_{gen}^{in}, \hat{t}_{gen}^{ex}, \hat{t}_{gen}^{in}$ – оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, образованных в волновых каналах в результате их взаимного влияния, $[\bar{W}_h], [\hat{t}_h]$ – оценки величин фронтов волн и моментов их возникновения в месте измерений, сформированные с использованием модели электрической сети аварийного режима; s и \hat{s} – измеренный сигнал переходного процесса и его оценка.

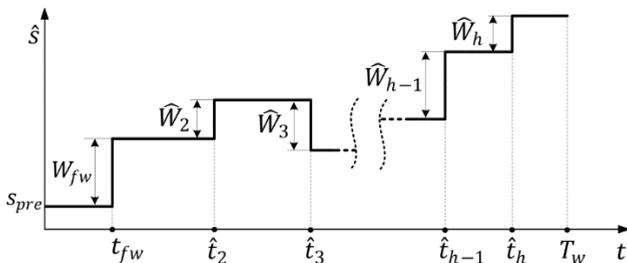


Рис. 2. Оценка сигнала переходного процесса \hat{s} , сформированная в модели электрической сети аварийного режима

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы (англ.-dynamic time warping, DTW) позволяет оценить степень соответствия между двумя сигналами, схожими по форме, но деформированными по оси времени [5].

Алгоритм DTW выравнивает измеренный сигнал переходного процесса s и его оценку \hat{s} по времени относительно друг друга и характеризует степень их сходства. С этой целью на первом этапе строится матрица расстояний, элементы которой равны модулю разности между каждым отсчетом измеренного сигнала s и его оценкой \hat{s} :

$$d(m, n) = |s(m) - \hat{s}(n)|, \quad m = \overline{1, q}, \quad n = \overline{1, q},$$

где q – количество отсчетов.

После этого строится матрица деформации, элементы которой определяются на основе матрицы расстояний [6]:

$$D(m, n) = \begin{cases} \sum_{k=1}^m d(k, 1), & \text{если } n = 1, \\ \sum_{k=1}^n d(1, k), & \text{если } m = 1, \\ d(m, n) + \min [D(m-1, n-1), D(m-1, n), D(m, n-1)]. & \end{cases}$$

Матрица деформации служит для определения соответствия сегментов сигналов s и \hat{s} . Соответствующие друг другу отсче-

ты сегментов формируют так называемый путь деформации w_e . После чего степень сходства сигналов определяется из целевой функции

$$DTW(s, \hat{s}) = \min \left(\frac{\sum_{e=1}^P d(w_e)}{P} \right), \quad (2)$$

где P – длина пути деформации.

Для каждого предполагаемого места повреждения x_s находится значение целевой функции $DTW(s, \hat{s})$ (2) и за истинное принимается то из них, которое характеризуется наименьшим значением целевой функции $DTW(s, \hat{s})$.

Выводы

В работе показано, что определение места повреждения односторонним волновым методом может осуществляться без распознавания волны, отраженной от места повреждения. С этой целью в модели электрической сети аварийного режима оценивается сигнал переходного процесса и сравнивается с сигналом, измеренным устройством, с помощью алгоритма динамической трансформации временной шкалы. За место повреждения принимается предполагаемое место повреждения, оценка сигнала переходного процесса для которого идентична измеренному сигналу.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina Limitations of Traveling Wave Fault Location // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) / Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 21-25, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

2. A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov and V. Hristoforov Theory of Single-end Traveling Wave Fault Location // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 68-74, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.

3. Фёдоров А.О., Петров В.С., Христофоров В.А. Особенности построения модели электрической сети аварийного режима в одностороннем методе волнового определения места повреждения линии электропередачи // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 133–139. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-133-139.

4. Фёдоров А.О., Петров В.С., Христофоров В.А. «Особенности оценки фронтов волн в задачах одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи», Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции Динамика нелинейных дискретных электротехнических систем ДНДС-2021, Чебоксары, 2021. С. 379–383.

5. R. Deller, H. Hansen, G. Proakis Discrete-Time Processing of speech signals, 1993, 908 p.

6. Y. Wang, P. Lei, H. Zhou, X. Wang, M. Ma and X. Chen Using DTW to measure trajectory distance in grid space // 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014, pp. 152–155.

Авторы:

Фёдоров Алексей Олегович, инженер-исследователь 3 кат. департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». E-mail: fedorov_a@ekra.ru.

Петров Владимир Сергеевич, руководитель группы научного сопровождения внешних НИОКР департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил в 2010 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Ивахно Дмитрий Олегович, студент факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: ivahno_do@ekra.ru.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Еремеев Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования аппарата искусственных нейронных сетей для проектирования систем управления бесколлекторными двигателями. В ходе работы в программе MATLAB Simulink было проведено моделирование систем управления на основе ПИД-регулятора и искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, система управления, бесколлекторный двигатель, моделирование.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ), так называемые вентильные двигатели, находят широкое применение в разных отраслях промышленности благодаря высокой эффективности, высокому коэффициенту полезного действия и низким эксплуатационным расходам [1]. Системы управления, используемые в высокопроизводительных электроприводах, чаще всего основаны на пропорционально-интегральном (ПИ) регуляторе или пропорционально-интегрально-дифференцирующем (ПИД) регуляторе. Это регуляторы с постоянным усилением, и для их проектирования требуются точные математические модели и быстроедействие системы управления. Электропривод БДПТ является нелинейным и часто бывает очень сложно получить точную математическую модель двигателя, используя обычные методы [2]. Вследствие этого возникает задача оптимального управления производительностью БДПТ при изменении рабочих условий: изменение нагрузки, насыщения, изменение параметров или распространения «шума» в сигналах обратной связи системы управления. Для решения данной задачи разрабатываются интеллектуальные и адаптивные системы управления БДПТ на основе микроконтроллеров [3]. На рис.1 представлена обобщенная структура системы управления БДПТ, где задаются опорные сигналы в виде скорости вращения ($\omega_{оп}$) и напряжение питания системы ($U_{пит}$).

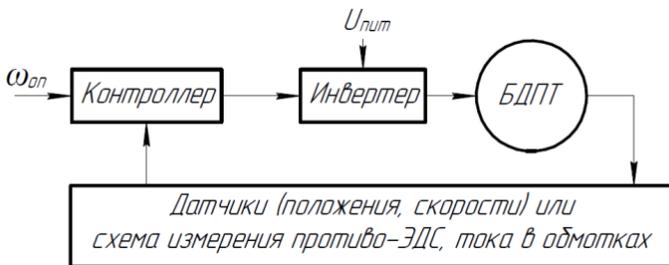


Рис. 1. Обобщенная структура системы управления БДПТ

В последние десятилетия широкое распространение получили искусственные нейронные сети [4], которые имеют большое многообразие форм и возможных приложений, что позволяет им решать широкий спектр задач, в том числе – в электротехнике и электроэнергетике [5-7]. Нейронные сети позволяют решать прогнозные задачи, в области диагностики электроприводов нейросетевые алгоритмы наиболее часто используют для выявления различных видов дефектов или аномальных режимов работы БДПТ. Применение нейросетевых алгоритмов позволяет достичь высокой производительности систем управления, а также исключить человеческий фактор при принятии решений [8].

Искусственные нейронные сети (ИНС) позволяют эффективно аппроксимировать динамику, не требуя, при этом, конкретных знаний о модели исследуемого объекта. При адекватном обучении, использование ИНС снижает время проектирования систем управления и позволяет реализовать более эффективные управляющие алгоритмы и структуры [9].

При помощи простых моделей БДПТ в программе MATLAB Simulink, с различными вариациями задающей скорости вращения и напряжения питания системы управления БДПТ, можно получить данные о скорости вращения ротора, силы тока в обмотках и другие параметры системы управления на основе ПИД-регулятора [10]. Полученные результаты представлены на рис. 2.

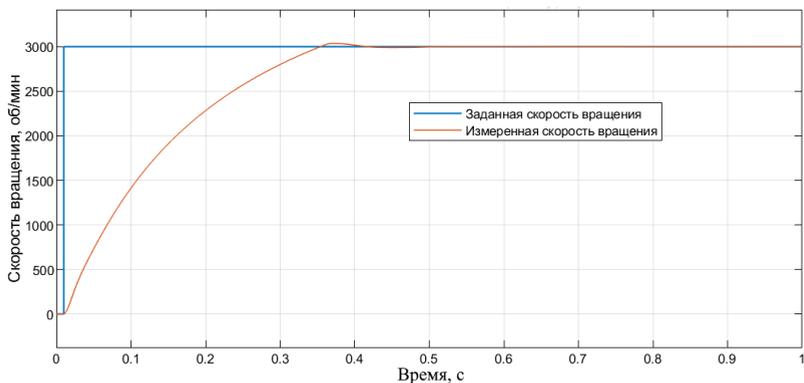


Рис. 2. График работы системы управления БДПТ на основе ПИД-регулятора

Также в программе MATLAB Simulink было проведено имитационное моделирование системы управления БДПТ на основе ИНС. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

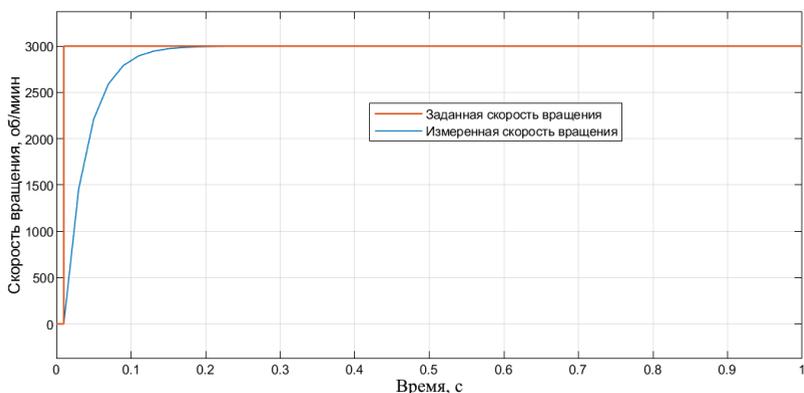


Рис. 3. График работы системы управления БДПТ на основе ИНС

Таким образом, проведен сравнительный анализ работы системы управления БДПТ на основе искусственной нейронной сети с системой управления БДПТ на основе ПИД-регулятора. В результате использования ИНС скорость вращения БДПТ достигает установившегося режима в 2 раза быстрее, без перерегулирования. Также необходимо отметить, что система управления

БДПТ на основе ИНС не имеет ошибок в установившемся режиме. Можно заключить, что проектирование систем управления на основе искусственных нейронных сетей является актуальной и востребованной задачей для увеличения эффективности использования и качества управления бесколлекторными двигателями постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М.П., Новиков А.Д. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.

2. N. Leena and R. Shanmugasundaram. Artificial neural network controller for improved performance of brushless DC motor. – International Conference on Power Signals Control and Computations (EP-SCICON), 2014, стр. 1–6.

3. Еремеев Н.А., Архипов А.В. Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем с помощью микроконтроллера // Материалы VI научно-практической конференции памяти О.В. Успенского / Сборник докладов, – М.: Издательский дом Академии Н.Е. Жуковского, 2019. – 240 с.

4. Славутский Л.А., Славутская Е.В. Выбор структуры нейронной сети для обработки сигналов как планирование эксперимента // Вестник Чувашикого университета. – 2021. – № 3. – С. 123-132. – DOI 10.47026/1810-1909-2021-3-123-132.

5. Anatoly Bychkov, Leonid Slavutskii , Elena Slavutskaya. Neural Network for Pulsed Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con). – P.8936. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248.

6. Кощев М.И. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

7. Кощев М.И. Элементарный перцептрон как инструмент анализа переходных процессов / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 84–93.

8. Стебаков И.Н., Попов С.Г., Корнаев А.В. Применение сверточных нейронных сетей для распознавания дефектов роторной системы. // XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: Сборник трудов конференции, Москва, 02–04 декабря 2020 года. – Москва: Федераль-

ное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 320-325.

9. *Hamidi KE, Mjahed M, Kari AE, Ayad H.* Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering, 2020.

10. *Leena N., Shanmugasundaram R.* Artificial Neural Network Controller for Improved Performance of Brushless DC Motor. (EPSCICON) Computation and Controls Signals Power on Conference, January 2014.

Авторы:

Еремеев Николай Алексеевич, аспирант кафедры автоматике и управления в технических системах Чувашского государственного университета. E-mail: nikoeremeev@mail.ru.

ОБУЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОТОРМОЖЕНИЯ

Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

Николаев К.П., ООО «Релематика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В работе показан способ обучения защиты генератора от однофазного замыкания на землю с применением модели классификации, используемой в машинном обучении. Разграничивающая модель (модель классификации) представляет собой линейную регрессию. Использование в качестве наблюдаемых величин напряжений реактора и нулевой последовательности «справа» третьей гармоники и частоты генератора позволяет полностью разграничить исследуемые режимы, и, следовательно, достичь максимально возможной точности классификации. Приведены полученные коэффициенты разграничивающей модели.*

***Ключевые слова:** защита генератора, классификация режимов работы, линейный классификатор.*

Введение

Наиболее частым видом замыкания в генераторе считается однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) в обмотке статора. Глав-

ная опасность ОЗЗ заключается в вероятности перехода в более сложные аварийные режимы, требующие отключения [1].

В работе [2] была показана возможность использования алгоритмов машинного обучения для целей релейной защиты, а именно для построения классификатора режимов работы объекта. В данной работе предлагается использовать линейную модель классификации для построения защиты генератора от ОЗЗ в режиме электроторможения.

Задача

Постановка задачи во многом опирается на терминологию информационной теории релейной защиты [3]. Разграничению подлежат следующие режимы генератора в процессе электроторможения: режимы, в которых произошло ОЗЗ, (α -режимы) и режимы, в которых не произошло никаких повреждений (β -режимы). Объект описывается имитационной моделью (ИМО), которая преобразует вектор объектных параметров модели \mathbf{x} в вектор наблюдаемых величин \mathbf{v} . Множества векторов объектных параметров G_α и G_β отображаются имитационной моделью в множества S_α и S_β , формируемые векторами наблюдаемых величин. Необходимо, используя имитационную модель объекта, а также допустимые диапазоны объектных параметров, построить классификатор, разделяющий α - и β - режимы. Известно, что в общем случае области S_α и S_β пересекаются, поэтому полученный классификатор должен удовлетворять требованиям гарантированной селективности (1) и максимальной чувствительности (2).

Формулировка требований в терминах машинного обучения:

$$TPR_\beta(a|S_\alpha, S_\beta) = 1, \quad (1)$$

где TPR – true positive rate или метрика полноты классификации, равная отношению количества верно распознанных альтернативных режимов к общему количеству альтернативных режимов; a – алгоритм классификации.

$$PPV_\beta(a|S_\alpha, S_\beta, TPR_\beta = 1) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где PPV – positive predictive value или метрика точности классификации, равная отношению количества верно распознанных

альтернативных режимов к количеству всех режимов, распознанных как альтернативные.

Линейная модель

В качестве линейной модели классификации (3) выбрана логистическая регрессия [4]:

$$A(\mathbf{v}) = \text{sign}(\mathbf{w}^T \mathbf{v} + w_0), \quad (3)$$

где $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_m]$ – вектор параметров разграничивающей модели; m – количество параметров; w_0 – смещение разграничивающей модели (свободный член полинома).

Объект исследования

В качестве объекта рассматривается генератор, заземлённый через дугогасящий реактор (ДГР). Схема замещения изображена на рис. 1.

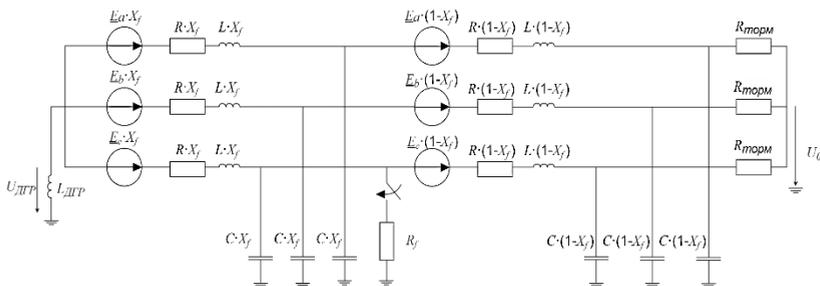


Рис. 1. Схема замещения генератора

Наблюдаются напряжение реактора и напряжение нулевой последовательности «справа». Вектор наблюдаемых величин содержит действительные и мнимые части напряжений реактора и нулевой последовательности «справа», приведённых к базовому вектору напряжения ДГР, и частоту генератора.

Генератор является источником возникновения не только основной, но и высших гармоник [5]. В работе [6] уже говорилось о возможности использования высших гармоник для создания защиты генератора от ОЗЗ. В этой работе используются значения напряжений третьей гармоники:

$$\mathbf{v} = [\text{Re}(\underline{U}_{\text{ДГР}}^{(3)}), \text{Re}(\underline{U}_0^{(3)}), \text{Im}(\underline{U}_0^{(3)}), \omega].$$

Для моделирования режимов на основе схем прямой, обратной и нулевой последовательностей составлена схема замещения генератора (рис. 2).

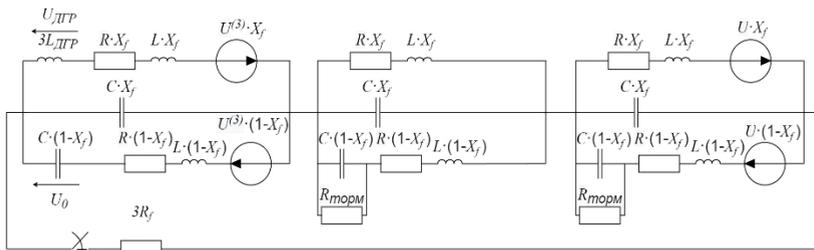


Рис. 2. Схема замещения генератора

Диапазоны варьируемых объектных параметров схемы замещения приведены в табл. 1: ω – частота сети; R_f – переходное сопротивление, X_f – координата места замыкания; U – модуль фазного напряжения; R , L – паразитные активное сопротивление и индуктивность обмоток генератора; C – поперечная паразитная ёмкость, V – расстройка компенсации ёмкостного тока сети; $R_{\text{торм}}$ – резистивная нагрузка для электроторможения; $U^{(3)}$ – модуль напряжения третьей гармоники. Для облегчения моделирования большого количества режимов индуктивность рассчитывается из значений расстройки компенсации, поперечной ёмкости для частоты 50 Гц.

Таблица 1

Параметры имитационной модели

Величина	Диапазон α	Диапазон β
X_f , о.е.	0.01 ... 0.99	
ω , рад/с	$2\pi \cdot 1$... $2\pi \cdot 50$	
R , Ом	10^{-6} ... 10^{-2}	
L , Гн	10^{-6} ... 10^{-3}	
C , Ф	$4.08 \cdot 10^{-6}$... $4.08 \cdot 10^{-5}$	
ϑ , %	-5 ... 5	
U , В	9093	
$U^{(3)}$, В	50 ... 500	
$R_{\text{торм}}$, Ом	10^{-6}	
R_f , Ом	10^{-6} ... 1	10^8

Согласно равномерному распределению сгенерирована выборка прецедентов, где прецедент – пара, включающая вектор наблюдаемых величин и тип режима (α - или β -). В табл. 2 приведены значения коэффициентов разграничивающей модели и достигнутая точность классификации.

Достигнутая точность говорит о том, что области α - и β -режимов не пересекаются, чего удалось достичь за счёт увеличения количества наблюдаемых величин.

Таблица 2

Результаты настройки параметров модели

Величина	Значение
w_0	-94024.858
w_1	1155.8392
w_2	4581.6746
w_3	-420088.36
w_4	1.9295
TPR_β	1.00
PPV_β	1.00

Заключение

1. Линейная модель классификации позволяет реализовать селективную защиту генератора от ОЗЗ в режиме электроторможения с максимальной чувствительностью. Преимуществами модели являются простота её реализации, и инвариантность к размерности наблюдаемого пространства.

2. Использование указанных в работе наблюдаемых величин позволяет достигнуть полного разграничения областей α - и β - режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вайнштейн Р.А.* Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности: специальность

05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вайнштейн Р.А. – Томск, 2011. – 45 с.

2. *Дементий Ю.А.* Активное обучение интеллектуальной релейной защиты. Противостоящие режимы / Ю.А. Дементий // Электрические станции. – 2021. – № 9(1082). – С. 45–53.

3. *Лямец Ю.Я.* Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. Граничные условия и обучающие процедуры / Лямец Ю.Я., Кержаев Д.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. // Известия вузов. Электромеханика – 2009. – С. 24–30.

4. *Vapnik V.*, The nature of statistical learning theory // Springer, New York, NY; 1st edition – 2000. – 314 p.

5. *Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.* Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт – 2011 – 767 с.

6. *Солдатов А.В.* Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока / Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Александрова М.И. // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 3(24). – С. 12–20.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com

Николаев Кирилл Петрович, студент факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: nikolaev.kirill.p@mail.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ НАГРУЗКИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Воронов П.Л., Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В статье приводятся аналитические характеристики синхронных двигателей при одновременном изменении частоты и напряжения в питающей системе электроснабжения.

Ключевые слова: частота, напряжение, синхронный двигатель, устойчивость узла нагрузки.

В последние годы во многих странах в связи с происшедшими системными авариями резко повысилось внимание и научный интерес к совершенствованию устройств и их правильного и обоснованного применения к автоматической частотной разгрузки (АЧР) как при снижении частоты, так и при её подъёме с целью восстановления нормальной работы систем электроснабжения (СЭС). Помимо непосредственного применения АЧР комплексно проводятся и другие мероприятия: частотный пуск резервных агрегатов, перевод гидрогенераторов из режима синхронных компенсаторов в режим выдачи активной мощности, а также целенаправленное и своевременное включение ЧАПВ и АПВ различных ЛЭП и систем АВР. На практике заметно возросла вероятность местных, локальных дефицитов мощности при широком использовании распределённой генерации, а также в связи с участвовавшими отключениями длинных ЛЭП, появились проблемы сохранения устойчивости работы систем, имеющих избыток генерируемой мощности. Наблюдались случаи необоснованного отключения генераторов, приводящие к аварийным ситуациям с понижением частоты.

Заметим, что режимы, связанные с возникновением снижения частоты из-за дефицита генерации активной мощности, как правило, сопровождаются и одновременным изменением напряжения в узлах нагрузки. Только зная состав и параметры различных потребителей, можно определить достаточно точно характеристики активной и реактивной мощности каждого из

узлов комплексной нагрузки и СЭС в целом при одновременном и взаимосвязанном изменении частоты и напряжения. Именно эти характеристики $P = \psi(f, U)$, $Q = \varphi(f, U)$ главным образом и требуются при решении практических задач для противоаварийной автоматики (ПА) и анализа установившихся и переходных процессов, включая и проблемы статической устойчивости СЭС.

В [1] были представлены аналитические выражения для активной и реактивной мощностей асинхронной нагрузки при изменении частоты и напряжения в питающей сети. Они получены на основе схемы замещения асинхронных двигателей (АД), разработанной в [2], и допущений, принятых в этой известной монографии.

Зная состав узлов нагрузки и параметры различных потребителей, можно путём расчётов найти значения мощностей узлов нагрузки от частоты, используя, например, методику, изложенную в [3]. Суммарная характеристика активной мощности при изменении частоты и $U = \text{const}$ определяется по формуле

$$P = a_0 P_{\text{ном}} + a_1 P_{\text{ном}} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} + a_2 P_{\text{ном}} \frac{\omega^2}{\omega_{\text{ном}}^2} + a_3 P_{\text{ном}} \frac{\omega^3}{\omega_{\text{ном}}^3},$$

где коэффициенты a_i – это долевое участие нагрузок от номинальной мощности: a_0 – не зависящий, а a_p – зависящий от частоты в соответствующей степени p . При этом регулирующий эффект активной мощности, равный $K'_f = dP/d\omega$, зависит от изменения частоты, а при $\omega = \omega_{\text{ном}}$ он равен $K'_f = a_1 + 2a_2 + 3a_3$. Однако, данная частотная характеристика и характеристика для реактивной мощности должны быть уточнены с учётом изменения напряжения по формулам, приведённым в [2, 3]. Наиболее полно вопрос об определении мощности потребителей при изменении частоты и напряжения изложен в [4].

Наличие в составе узлов нагрузки синхронных двигателей (СД) оказывает благоприятное влияние на качество электроэнергии и устойчивость комплексных узлов нагрузки. Естественно, что вырабатываемая СД реактивная мощность нахо-

дится в строгой зависимости от потребления им активной мощности, напряжения и частоты в питающей сети, а также от тока возбуждения. Однако вопрос выбора оптимального режима работы СД даже при номинальных значениях напряжения и частоты является весьма трудной эксплуатационной задачей.

Изменение частоты оказывает существенное влияние на режим работы СД. Если предположить, что нагрузка на валу и ток возбуждения являются номинальными, а частота сети изменяется, то даже при отсутствии АРВ ток обмотки возбуждения будет изменяться вследствие изменения ЭДС возбудителя, зависящей от скорости вращения машины $E_b \equiv \omega = K_f \omega_c$. Заметим, что при форсировке возбуждения и частоте $f = K_f f_{\text{ном}}$ ток форсировки будет равным

$$I_{\text{Впр}} = I_{\text{Вном}} K_f K_{\text{Вф}},$$

где $K_{\text{Вф}}$ – это кратность тока возбуждения.

Заметим, что для вентильных систем возбуждения ток не зависит от частоты, поскольку он пропорционален лишь напряжению сети. Но при наличии АРВ ток возбуждения при изменении напряжения и частоты становится крайне сложной функцией этих параметров. Серийные тиристорные системы возбуждения (ТВУ) и бесщёточные (БВУ), например при пуске, могут изменять ток возбуждения в функции тока статора, а также обеспечивать форсировку возбуждения при снижении напряжения в питающей сети до $0,8 U_{\text{ном}}$ и её снятия при восстановлении напряжения до $0,95 U_{\text{ном}}$. Автоматическое регулирование тока возбуждения можно вести по поддержанию напряжения сети и угла φ , по реактивному или активному току, углу δ между E_q и напряжением сети. Отсюда следуют вопросы, связанные с блокировками при действии устройств АЧР и ПА. Только в простейших случаях можно принять, что ток возбуждения при применении ТВУ изменяется пропорционально напряжению сети и кратности $K_{\text{Вф}} = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{Вном}}}$, т.е. $I_{\text{В}} \approx K_{\text{и}} K_{\text{Вф}} I_{\text{Вном}}$.

При изменении частоты питания СД, принимая во внимание, что $\omega = K_f \omega_0$, можно считать, что электромагнитная мощность, определяется выражением

$$P_a = \omega M_a = K_f \omega_0 M_a ,$$

причём M_a является функцией характеристики механизма на валу СД. Все индуктивности СД тоже изменяются пропорционально изменению частоты. Тогда можно принять для систем с ТВУ что $E_q = \omega E_{q\text{ном}}$, а для машинных систем – $E_q = \omega^2 E_{q\text{ном}}$.

Для общего случая, когда изменяются и напряжение, и частота сети, ЭДС определяется по известной формуле:

$$E_{*q} = \sqrt{(K_u \cos \varphi)^2 + (K_u \sin \varphi + K_f X_d I)^2} .$$

А после некоторых преобразований можно получить следующие выражения:
для ЭДС

$$E_{*q} = \sqrt{K_u^2 + 2K_f X_d \alpha \sin \varphi_{\text{ном}} + \left(\frac{K_f X_d^2}{K_u} \right) (\beta^2 \cos^2 \varphi_{\text{ном}} + \alpha^2 \sin^2 \varphi_{\text{ном}})} , \quad (1)$$

для вращающегося момента

$$M_* = \frac{M_a}{M_{\text{ном}}} = \frac{P_a}{K_f P_{\text{ном}}} = \frac{1}{\eta \cos \varphi_{\text{ном}}} \left[\frac{E_{qf} K_u}{K_f X_d} \sin \delta + \frac{K_u^2}{2K_f^2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] . \quad (2)$$

В (1) и (2) учтено, что

$$E_{qf} = K_f \frac{I_{Bf}}{I_{\text{ВХХ}}} ,$$

$$I^2 = \frac{1}{K_u^2} (\beta^2 \cos^2 \varphi_{\text{ном}} + \alpha^2 \sin^2 \varphi_{\text{ном}}) ,$$

где $I_{\text{ВХХ}}$ – ток возбуждения в режиме холостого хода при номинальных значениях частоты и напряжения; $\alpha = \frac{Q_{\text{СД}}}{Q_{\text{ном}}}$; $\beta = \frac{P_{\text{СД}}}{P_{\text{ном}}}$.

Поскольку СД допускают регулирование максимального вращающегося момента с помощью тока возбуждения, то в этом проявляется одно из преимуществ их перед АД, причем СД менее чувствительны к отклонениям и колебаниям напряжения. При заданной нагрузке на валу СД активная составляющая тока статора изменяется обратно пропорционально напряжению, а реактивная составляющая по более сложному закону. Если не учитывать насыщение, то значение реактивной мощности при изменении частоты и напряжения можно найти по формуле:

$$Q_* = \frac{\sqrt{K_f^2 K_u (1 + 2X_d \sin \varphi_{\text{НОМ}} + X_d^2) - (\beta X_d \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 - \frac{K_u^2}{K_f}}}{X_d \sin \varphi_{\text{НОМ}}}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при значительных снижениях частоты и напряжения и неизменном токе возбуждения выдача в сеть реактивной мощности уменьшается и оба фактора характеризуются однонаправленным действием. Кроме того СД с большим X_d в этом плане имеют более неблагоприятные характеристики.

Сложность учета одновременного изменения частоты и напряжения в СЭС при внедрении устройств АЧР и ПА, например, микропроцессорного блока релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-РЧ (АО «ЧЭАЗ») или шкафа частотоделительной автоматики станций с выделением на сбалансированный энергоайон и СН (ЭКРА.656453.2230606 РЭ) могут быть исключительно эффективными только при тщательном учете характеристик конкретных комплексных узлов нагрузок соответствующих СЭС. Способность реагировать не только на отклонение частоты, но и на скорость изменения частоты, и на отклонение напряжения, предусмотренная в устройстве ООО НПП «ЭКРА», при соответствующей наладке позволит не допустить нарушения технологических процессов на тепловых ЭС и массового прекращения электроснабжения из-за лавинообразного снижения частоты и напряжения в СЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Щедрин В.А. Влияние изменения частоты и напряжения в питающей сети на параметры режима уз-

лов комплексной нагрузки//Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I междунар. научн.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – 272 с.

2. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

3. *Рабинович Р.С.* Автоматическая разгрузка энергосистем. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.

4. *Щедрин В.А.* Процессы в узлах нагрузки при медленных изменениях напряжения и частоты. Текст лекций. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1985. – 60 с.

Авторы:

Воронов Павел Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова» ФГБОУ ВО ЧГУ им. И. Н. Ульянова. Закончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета в 2014 году. В 2019 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и реализация методик и алгоритмов расчета по частям симметричных и несимметричных режимов систем электроснабжения». E-mail: plv911@mail.ru.

Ермолаева Надежда Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова Чувашского государственного университета. Закончила факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1972 году. В 1999 получила ученую степень кандидата технических наук. Тема диссертации «Разработка методов и алгоритмов расчета режимов электрических систем на основе диакоптики». E-mail: n.t.ermolaeva@mail.ru.

Кокорев Николай Алексеевич, старший преподаватель кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова Чувашского государственного университета. Закончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1974 году. E-mail: kokorev1952@yandex.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОСЕТЕЙ

Петряшин И.Е., Золотов А.А., ООО «НПП ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В статье рассматривается применение нейросетей к задаче распознавания структуры электрического сигнала. Предложена типовая архитектура нейросети, а также сформулированы принципы формирования обучающей выборки, репрезентативно описывающей многообразие сигналов. Кроме того, предложено преобразование, позволяющее применять рассмотренный нейросетевой метод к сигналам любой амплитуды.

Ключевые слова: нейронная сеть, структурный анализ сигнала.

Первоочередной задачей цифровой обработки сигнала является определение его структуры [1, 2]. Решение этой задачи предполагает определение компонентов сигнала.

Известны методы решения данной задачи, основанные на оценивании отклонения наблюдаемого сигнала от модельного [3]. Однако их применение оказывается затруднительным в случае многокомпонентных сигналов.

В данной работе предлагается нейросетевой метод определения структуры сигнала, использование которого не ограничивается числом компонентов.

Модель сигнала

Электрический сигнал, наблюдаемый в энергосистеме, представляет собой сумму (1) компонентов:

$$\vartheta(t) = \sum_{i=1}^N v_i(t), \quad (1)$$

где N – число компонентов сигнала, $v_i(t)$ – i -ый компонент сигнала.

В данной работе множество компонентов $v(t)$ задается выражением (2):

$$v(t) = \begin{cases} A_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1) \\ A_3 \sin(6\pi ft + \varphi_3) \\ A_e e^{-\beta_1 t} \\ A_f e^{-\beta_2 t} \sin(2\pi ft + \varphi_f), \end{cases} \quad (2)$$

однако в общем случае оно может быть дополнено.

Диапазоны изменения параметров данных компонентов представлены в таблице. Частота f меняется в диапазоне $49 \div 51$ Гц.

Таблица

Диапазоны изменения параметров компонентов сигнала

Компонент	Логическое представление	Параметр	Диапазон изменения
Первая гармоника $A_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1)$	[1, 0, 0, 0]	A_1	$0 \div 1$
		φ_1	$0 \div 2\pi$
Третья гармоника $A_3 \sin(6\pi ft + \varphi_3)$	[0, 1, 0, 0]	A_3	$(0 \div 0,5)A_1$
		φ_3	$0 \div 2\pi$
Апериодическая составляющая $A_e e^{-\beta_1 t}$	[0, 0, 1, 0]	A_e	$(-1 \div 1)A_1$
		β_1	$1 \div 20$
Затухающая гармоника $A_f e^{-\beta_2 t} \sin(2\pi ft + \varphi_f)$	[0, 0, 0, 1]	A_f	$0 \div 1$
		β_2	$1 \div 20$
		φ_f	$0 \div 2\pi$

Обучающая выборка

Для обучения нейросети необходимо сформировать обучающую выборку, репрезентативно описывающую множество сигналов. В данной работе для ее формирования предлагается следующий принцип:

1. Рассматривается сигнал, являющийся комбинацией компонентов (например, первая гармоника + третья гармоника, первая гармоника + апериодическая составляющая, и другие).

2. Для сигнала исходя из входящих в него компонентов определяется количество варьируемых параметров.

3. В пространстве варьируемых параметров наносится сетка, координаты узлов которой являются параметрами сигналов обучающей выборки. Например, на рис. 1 представлены параметры сигнала, содержащего только первую гармонику.

4. Формируются сигналы обучающей выборки с параметрами узлов сетки.

5. Сигналам сопоставляются векторы ответов, соответствующие логическому представлению компонентов. Так, сигналу, содержащему первую гармонику и апериодическую составляющую, сопоставляется вектор [1, 0, 1, 0].

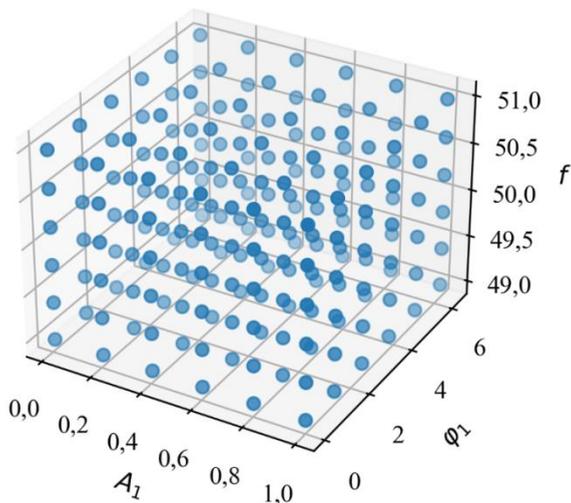


Рис. 1. Параметры обучающей выборки в случае трехпараметрического сигнала

Согласно данному принципу генерируется 5 видов сигналов, соответствующих представлениям: $[1, 0, 0, 0]$, $[1, 1, 0, 0]$, $[1, 0, 1, 0]$, $[1, 1, 1, 0]$ и $[0, 0, 0, 1]$. Каждому виду сигнала соответствует 400000 прецедентов. При этом предполагается, что частота дискретизации составляет 1000 Гц и доступно 10 отсчетов сигнала.

Масштабирование сигнала

Сигналы, наблюдаемые в энергосистеме, имеют значительно отличающуюся амплитуду. Сигналы же обучающей выборки имеют фиксированную амплитуду и задают многообразие форм сигналов. Исходя из этого необходимо выполнить преобразование сигналов к одному масштабу. Данное преобразование задается выражением (3):

$$\hat{\vartheta}(k) = \frac{1}{\max(|\vartheta(k)|)} \vartheta(k) \quad (3)$$

где $\vartheta(k)$ – последовательность отсчетов сигнала до преобразования.

Данное преобразование приводит сигнал любой конфигурации к диапазону $[-1, 1]$.

Архитектура используемой нейросети

В работе используется трехслойная полносвязная нейросеть (рис. 2), состоящая из входного слоя, 1 скрытого слоя и выходного слоя. Количество нейронов во входном слое соответствует количеству отсчетов сигнала и равно 10, количество нейронов в выходном слое равно количеству возможных компонентов сигнала и равно 4, а количество нейронов скрытого слоя равно 128.

В качестве функции активации выходного слоя используется сигмоидная функция, принимающая значения от 0 до 1. Ее использование целесообразно, так как нейросеть используется для определения наличия компонентов (1 – компонент присутствует, 0 – компонент отсутствует). Функцией активации скрытого слоя выбрана ReLu.

Функцией потерь при обучении выступает MSE (средне-квадратичная ошибка).

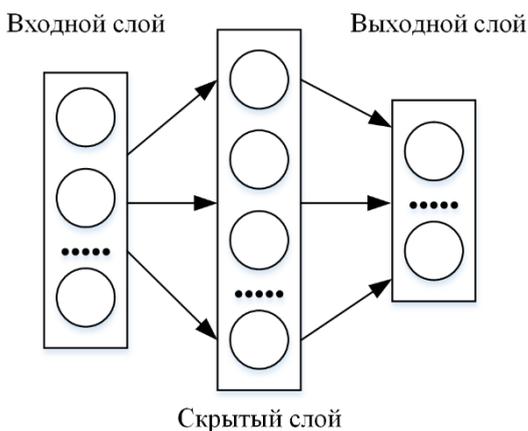


Рис. 2. Архитектура используемой нейросети

Обучение нейросети

Обучение нейросети производится при помощи метода обратного распространения ошибки [4]. В качестве оптимизатора используется Adam [5].

Для повышения качества работы нейросети скорость обучения (learning rate) уменьшается каждую эпоху обучения согласно закону, представленному на рис. 3.

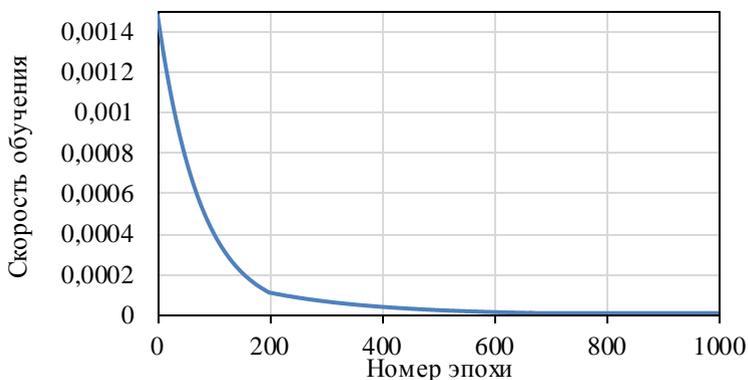


Рис. 3. Зависимость скорости обучения от номера эпохи

Обучение нейросети продолжается 1000 эпох, размер батча (batch size) составляет 800.

Доля правильных ответов на обучающей выборке (accuracy) составляет 99,8%. Неправильно распознанными оказываются сигналы, в которых уровень какого-то из компонентов очень низок, причем ошибка наблюдается именно по таким компонентам, поэтому она является не критичной (так как наличием компонента можно пренебречь, если его уровень крайне низок).

Валидация модели

Для валидации модели сгенерирована тестовая выборка, размер которой равен размеру обучающей выборки. Данная выборка генерируется по тому же принципу, что и обучающая, изменения присутствует только в сетке разбиения (это необходимо, чтобы выборки не совпадали). Доля правильных ответов на данной выборке составляет 99,4%. Неправильно распознанными также оказываются сигналы, в которых уровень какого-то из компонентов мал.

Выводы

Предложен нейросетевой метод определения структуры сигнала, который может быть использован для сигналов с любым количеством компонентов одинаково эффективно.

Сформулированы принцип формирования обучающей выборки, репрезентативно описывающей многообразие сигналов.

Предложено преобразование, позволяющее применять данный метод к сигналам любой конфигурации путем их масштабирования к обучающей выборке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – 334 с. – ISBN 9785767725717.

2. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №2. – С. 18–28.

3. Иванов С.В. Спектральный анализ электрической величины по малому числу отсчетов / С.В. Иванов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов: Материалы конференции в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2019, Чебоксары, 23–26 апреля 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 23–30.

4. Shekhar S., Xiong H. Artificial Neural Network. In: Shekhar S., Xiong H. (eds) Encyclopedia of GIS. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_72.

5. Bock S., Weiß M. (2019) Non-convergence and Limit Cycles in the Adam Optimizer. In: Tetko I., Kůrková V., Karpov P., Theis F. (eds) Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Deep Learning. ICANN 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11728. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30484-3_20.

Авторы:

Петряшин Илья Евгеньевич, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», студент 4 курса бакалавриата ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: petryashin.i.e@mail.ru.

Золотов Александр Артурович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 году факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТЕВОГО АНАЛИЗАТОРА ДАННЫХ В ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Кокшев П.А. АО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары, Россия

Научный руководитель **Галанина Н.А.**, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Данный доклад освещает механизм и принципы работы сетевого анализатора данных, предназначенной для применения на цифровой подстанции.*

***Ключевые слова:** IEC 61850, цифровая подстанция, SCL, протоколы передачи данных, интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ), нейронная сеть, информационная безопасность.*

Развитие промышленности и энергетики привело к повсеместному внедрению стандарта МЭК 61850, которое ознаменовало переход от традиционных типов подстанций к цифровым.

Данный стандарт включает в себя описание относительно новых протоколы передачи данных, а именно MMS, GOOSE и SV, а также описания процесса проектирования и конфигурирования цифровой подстанции.

С появлением новых протоколов передачи данных и цифровых устройств, начали формироваться новые требования к надежности и производительности системы. Появилась необходимость в регистрации информационных потоков на цифровых подстанциях с целью мониторинга состояния оборудования.

Реализация сетевого анализатора трафика

Анализ данных представляет собой процесс сбора всех данных, проходящих через определенный сетевой интерфейс. Благодаря этому появляется возможность мониторинга сети и перехват пакетов, проходящих через эту сеть. Алгоритм работы анализатора сетевых пакетов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм работы анализатора сетевых пакетов

В частности, анализатор данных позволяет:

1. проверять правильность настройки конфигурации оборудования на подстанции;
2. выявлять аномалии и нарушения безопасности данных.

Проверка конфигурации оборудования

Проверка осуществляется путем разбора сетевых пакетов и их сравнения с SCD-файлом. Это дает возможность сразу после интеграции нового оборудования в систему и его запуска проверить соответствие публикуемых им сообщений с файлом конфигурации подстанции.

На рис. 2 приведен лог работы программы при неправильной конфигурации устройства. Как видно из рисунка, пакеты, содержащие параметры, не соответствующие конфигурационному файлу подстанции отмечены желтым цветом. Это говорит о том, что данное устройство есть в списке разрешенных устройств, но неправильно сконфигурировано, пакеты, отмеченные красны цветом, это означает то, что устройства, посылающего данные пакеты нет в списке разрешенных устройств.

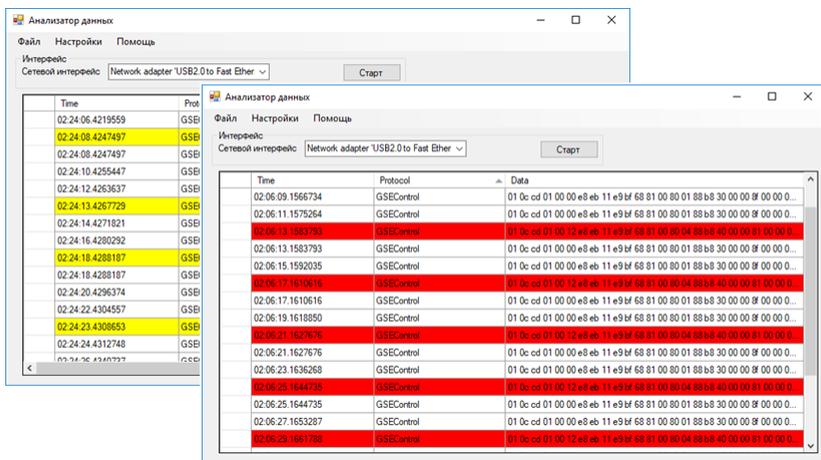


Рис. 2. Интерфейс работы программы

Обеспечение информационной безопасности

Как уже было сказано, в файле конфигурации подстанции содержится вся информация о сетевых параметрах всех

устройств на объекте. С помощью этой информации можно создать белый список IP-адресов и MAC-адресов. Если в сети появляется устройство с IP-адресом или MAC-адресом, которого нет в списке, оператор и пользователь должны быть об этом проинформированы.

Упрощенная логика работы при анализе пакетов при анализе пакетов показана на рис. 3.

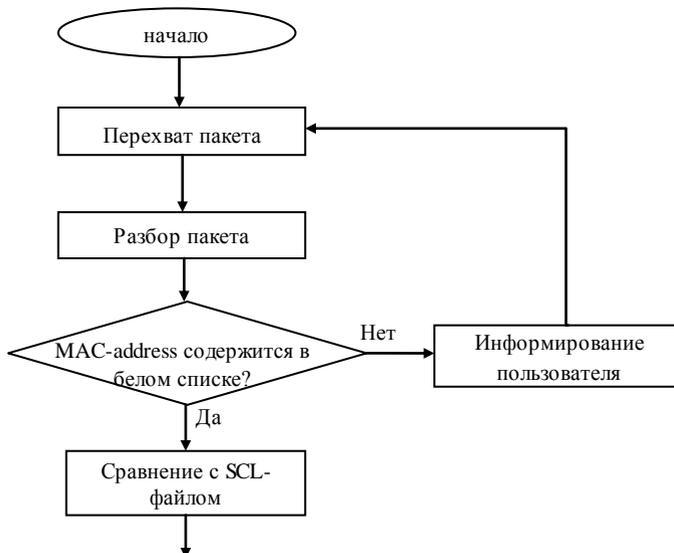


Рис. 3. Часть алгоритма анализа пакетов

Одной из ключевых задач сетевого анализатора состоит в идентификации и реагировании на подозрительную деятельность внутри сети и на неправильную работу подключенных в эту сеть устройств. Для этих целей применяются алгоритмы нейронных сетей, что позволяет [1]:

- 1) выявлять сетевые атаки в режиме реального времени;
- 2) по набору признаков определять тип атаки и ее характеристики;
- 3) определять неправильное функционирование устройств сети;
- 4) предупреждать аномальные явления и противодействовать им.

Основное преимущество применения нейронной сети для выявления вторжений – гибкость, которую предоставляет эта технология. Нейронная сеть может анализировать данные из сети, даже если данные являются неполными или искаженными. Кроме того, она способна выполнять анализ с данными в нелинейном виде. Обе эти характеристики важны в сетевой среде, где получаемая информация подвержена случайным системным ошибкам [2].

Выводы

Применение сетевого анализатора данных открывает новые возможности для контроля информационных потоков в цифровых подстанциях и упрощает процесс интеграции нового оборудования. В частности, использование нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений повышает надежность и качество работы системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кокшев П.А.* Исследование и разработка нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П.А. Кокшев, Н.А. Галанина // Информационные технологии – основа стратегического прорыва в современной промышленности: материалы VI Всероссийской студенческой конференции. – Йошкар-Ола, 2020. – С. 83-85.

2. *Кокшев П.А.* Преимущества применения нейронной сети с архитектурой многослойного персептрона для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П.А. Кокшев, Н.А. Галанина // Динамика нелинейных дискретных электротехнических Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 127-129.

Авторы:

Кокшев Павел Андреевич, ведущий программист – специалист по защите информации АО «ЧЭАЗ». Закончил факультет информатики и вычислительной техники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, в 2020 году закончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Математическое и программное обеспечение автоматизированных систем». E-mail: p.kokshev@cheaz.ru.

Научный руководитель Галанина Н.А., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры МИАОИС ЧГУ им. И.Н. Ульянова

ОТСЛЕЖИВАНИЕ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА ТРАНСФОРМАТОРА С ПОМОЩЬЮ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ

Клочкова Н.Н., Гречушкин Д.В., ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия

***Аннотация.** Наиболее важным оборудованием высоковольтных электрических сетей является силовой трансформатор. Основываясь на преимуществах технологии оптоволоконного зондирования, были проведены некоторые исследования, которые могут оказаться полезными для онлайн-мониторинга частичных разрядов трансформатора. Эти исследования были направлены на повышение надежности мониторинга безопасности энергосистемы.*

***Ключевые слова:** трансформатор, частичный разряд, оптоволоконное зондирование.*

1. Вступление

Многочисленные исследования показывают, что наиболее частой причиной неисправности трансформатора является ухудшение его изоляции. В настоящее время в электроэнергетике реализуется система регулярного технического обслуживания для предотвращения и устранения выхода из строя трансформатора. Несмотря на то, что нормальная работа энергосистемы играет большую роль, в период технического обслуживания необходимо отключать трансформатор, техническое обслуживание и ремонт занимает много времени, а процесс ремонта может привести к другим повреждениям трансформатора. Это демонстрирует ограничения метода автономного обслуживания.

Трансформатор является основным оборудованием, обеспечивающим нормальную работу энергосистемы и надежность электроснабжения. Появление неисправности приводит к вынужденному повсеместному отключению питания, что в значительной степени влияет на функционирование промышленных предприятий и повседневную жизнь людей, а это приведет к огромным экономическим потерям. Согласно большому количеству статистических данных, основной причиной ухудшения изоляции трансформатора является частичный разряд. Очевидно, что частичный разряд становится важным признаком ухудшения изоляционных характеристик трансформатора. С помо-

щью системы онлайн-мониторинга трансформатора можно своевременно узнать рабочее состояние, обнаружить частичный разряд, определить точное местоположение области дефекта изоляции, а затем оперативно отремонтировать трансформатор. Таким образом, исследование системы онлайн-мониторинга частичных разрядов, представленное в этой статье, крайне актуально.

В настоящее время для поддержания отличных изоляционных характеристик многие силовые трансформаторы заполнены трансформаторным маслом внутри и снабжены изоляционными материалами, такими как картон. Доказано, что такая конструкция обладает хорошими механическими свойствами и электрической прочностью, но все же имеет некоторые недостатки, присущие внутренним материалам из-за сложности производственного процесса. Например, изоляционные материалы имеют трещины и пузыри или взвешенные частицы и металлические заусенцы в трансформаторном масле, и все перечисленные дефекты могут привести к частичному разряду трансформатора.

Итак, важным признаком ухудшения изоляции трансформатора является частичный разряд. Таким образом, оперативный мониторинг трансформатора сможет в реальном времени отразить условия работы трансформатора, обнаружить явления частичных разрядов и локализацию дефектов изоляции, своевременно и эффективно отремонтировать трансформатор. Изучение онлайн-мониторинга частичных разрядов имеет немаловажное значение.

Среди методов онлайн-мониторинга частичных разрядов использовались пьезоэлектрические и емкостные датчики для обнаружения сигналов, на которые могут легко повлиять электромагнитные сигналы. Благодаря преимуществу защиты от электромагнитных помех технология оптоволоконного зондирования может компенсировать дефекты пьезоэлектрических и емкостных датчиков. Между тем, с точки зрения изоляционных преимуществ сенсорной технологии, она станет основной технологией тестирования безопасности трансформаторов. На данный момент технология волоконно-оптического датчика акустической эмиссии для отслеживания сигнала частичного разряда стала предметом исследований.

2. Датчики и сенсорные системы

Как показано на рис. 1, в процессе подготовки необходимо сначала скрепить кварцевую диафрагму и кварцевую гильзу вместе, а затем сделать то же самое с кварцевым наконечником и волокном. Во-вторых, необходимо точно разместить корпусную конструкцию и врезную конструкцию в стреле. Более того, регулируя зажимное приспособление, можно получить необходимую длину полости и контраст полос. Наконец, процесс производства датчика завершен.

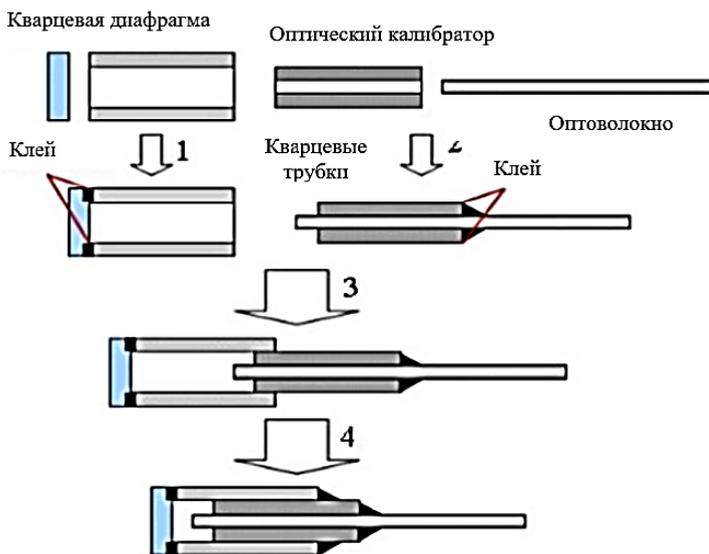


Рис. 1. Блок-схема технологии изготовления волоконного датчика

В третьем процессе, как показано на рис. 1, подключается оптоволоконный жгут к оптическому пути, подсоединяется широкополосный источник суперлюминесцентного светоизлучающего диода и спектрометр, и в этот момент ведется наблюдение за спектром интерференции. Когда был получен некоторый фиксированный спектр помех, был зафиксирован датчик и получен спектр, который показан на рис. 2. Согласно анализу спектра на рис. 2, была наконец получена длина резонатора и коэффициент контрастности полос путем расчета.

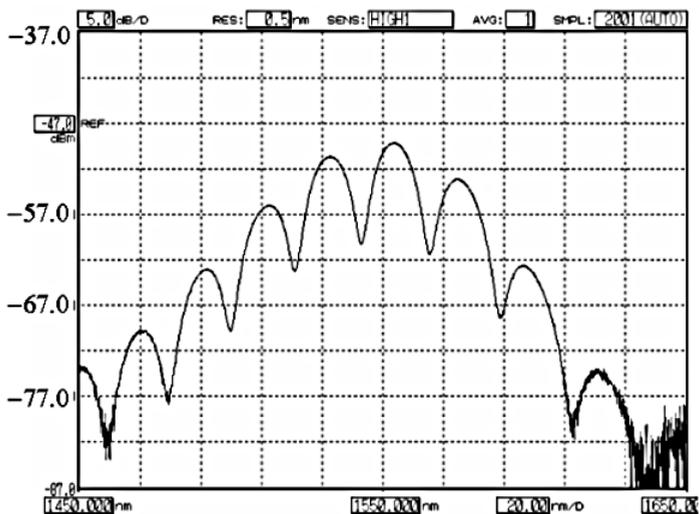


Рис. 2. Спектр помех датчика (размер полости около 60 мкм)

Как показано на рис. 3, сначала был подключен датчик к одному порту муфты и найдена оптимальная рабочая длина волны через измеритель оптической мощности; была изменена длина волны на лучшую рабочую точку датчика и подключен еще один порт муфты; затем был подключен демодулятор к последнему порту муфты; наконец, был подключен цифровой осциллограф к демодулятору. В ходе эксперимента была установлена система демодуляции, которую можно увидеть на рис. 3.

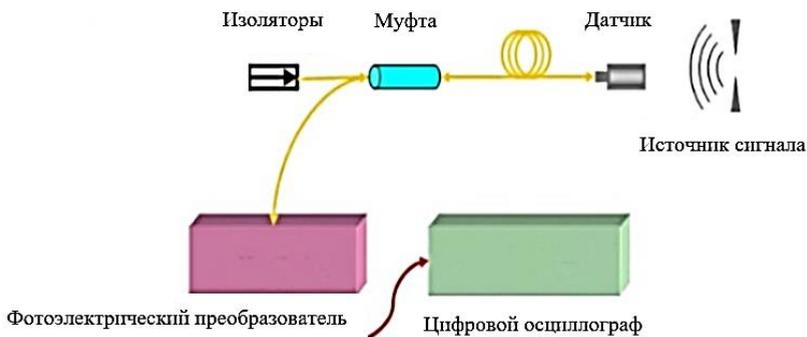


Рис. 3. Графическая схема сенсорной системы демодуляции волоконного датчика

Вместо прямого измерения сигнала частичного разряда были использованы сигналы разряда кончика разрядного электрода для генерации частичного разряда. Фактически, сигналы частичного разряда трансформатора передавались маслом, что приводило к медленному затуханию сигнала. Для сравнения, частично сгенерированный сигнал передавался по воздуху, что приводило к быстрому ослаблению ультразвука.

3. Результаты и их анализ

3.1 Анализ и эксперименты с различной интенсивностью разряда на одном и том же расстоянии срабатывания

В таблице пиковое напряжение может быть качественно описано как интенсивность сигнала источника, что указывает на то, что чем выше пиковое напряжение, тем сильнее сигнал, подаваемый источником сигнала. Пиковая частота может использоваться для описания толщины датчика с кварцевой диафрагмой. Амплитуда пиковой частоты может использоваться для описания фактического обнаруженного времени затухания датчика. Во время процесса ослабления пикового напряжения от относительно высокого положения до нуля более высокая амплитуда означает более длительное время фактически обнаруженного ослабления и более медленную тенденцию ослабления.

Согласно данным в таблице пиковое напряжение уменьшается в соответствии с убывающим порядком сигнала разряда, например, когда пиковое напряжение достигает 2000 В, сигнал разряда сильнее, что согласуется с теоретическим анализом; в районе 350 кГц три группы пиковых частот относительно похожи, это показывает, что переменная величина длины резонатора (фаза Δd) ограничена интервалом $(-\pi / 2, \pi / 2)$.

Таблица

Параметры сигнальных характеристик датчика при разной интенсивности разряда

Сигнал разряда (В)	400	420	2000
Пиковое напряжение (В)	0,14	0,196	0,284
Пиковая частота (кГц)	348	352	348
Амплитуда (В)	77,1	40,5	81,1

3.2. Эксперимент и анализ разряда одинаковой интенсивности на разных расстояниях обнаружения

Во время этого эксперимента использовался сигнал разряда 2000 В в качестве источника сигнала и датчик с длиной резонатора 50 мкм и контрастностью 10 дБ для обнаружения ультразвукового сигнала, возбуждаемого источником сигнала. Формы измеренных сигналов разряда с разными расстояниями срабатывания показаны на рис. 4.

Согласно рис. 5, *в*, когда расстояние срабатывания составляет 15 мм, после преобразования Фурье измеренные данные могут достигать той же пиковой частоты (320 кГц), что и на рисунках 5, *а*, *б*. Причина может быть объяснена тем, что происходит серьезное ослабление сигнала разряда, когда расстояние срабатывания превышает 15 мм. В результате принятый сигнал становится слабым, и сигнал искажается, потому что обнаруженный сигнал накладывается на шум, и ошибки появляются при анализе данных с помощью быстрого преобразования Фурье.

Согласно результатам экспериментов, интенсивность разряда, пиковая частота и амплитуда измеряемого сигнала отрицательно коррелируют с расстояниями срабатывания. Расстояние срабатывания и пиковое напряжение, расстояние срабатывания и амплитуды частот отклика отдельно показаны на рис. 6, *а*, *б*.

Как показано на рис. 6, *а*, *б*, с увеличением расстояния срабатывания мощность принимаемого сигнала очень быстро падает, когда расстояние срабатывания превышает 10 мм, измеренный сигнал становится неочевидным. Чтобы еще больше увеличить расстояние срабатывания, была увеличена чувствительность датчика.

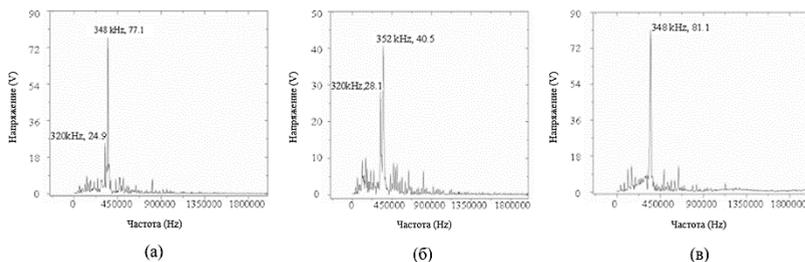


Рис. 4. Спектрограмма сигнала частичного разряда при трех различных напряжениях: *а* – сигнал разряда 400 В, *б* – сигнал разряда 420 В, *в* – сигнал разряда 2000 В

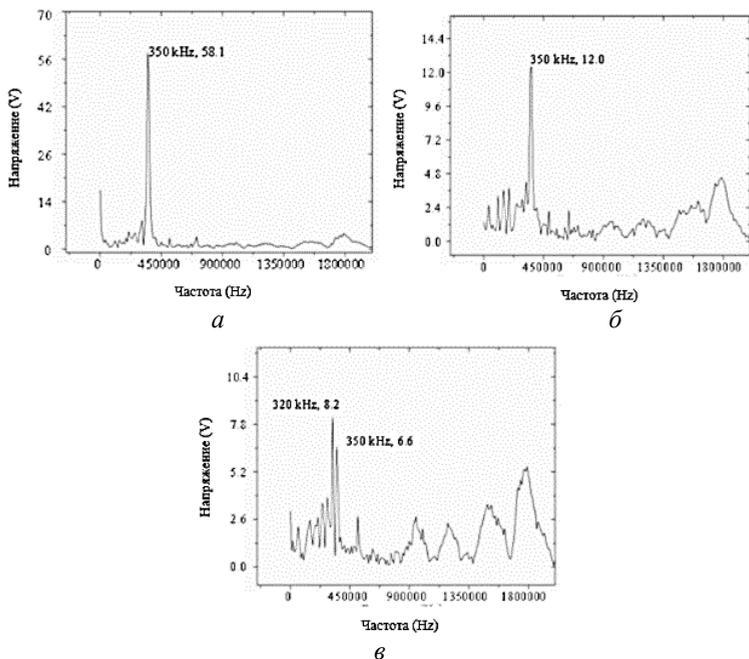


Рис. 5. Спектрограмма сигнала частичного разряда с тремя разными расстояниями восприятия: *a* – измеренный сигнал на расстоянии 5 мм, *б* – измеренный сигнал на расстоянии 10 мм, *в* – измеряемый сигнал на расстоянии 15 мм

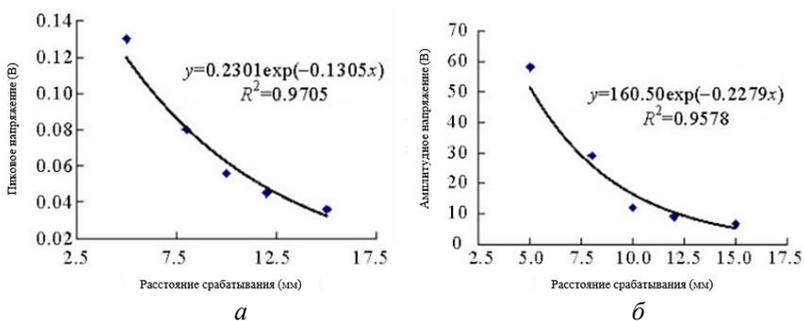


Рис. 6. Соотношение между расстоянием срабатывания и пиковым напряжением сигнала: *a* – расстояние срабатывания и пиковое напряжение, *б* – расстояние срабатывания и амплитуда вибрации

4. Выводы

Силовой трансформатор является очень важным оборудованием в энергосистеме, поэтому следует контролировать частичный разряд трансформатора и своевременно диагностировать его. Основываясь на многих преимуществах метода оптического обнаружения частичных разрядов (оптоволоконное зондирование), были проведены некоторые исследования оптоволоконного зондирования, которое можно было бы использовать для контроля частичного разряда и внести положительный вклад в повышение надежности мониторинга безопасности энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. Москва: Техносфера, 2008. - 520 с.

2. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем: монография - СПб: ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. – 191 с.

Авторы:

Клочкова Наталья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Закончил электротехнический факультет ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в 1996 году. E-mail: klochkowa.nata@yandex.ru.

Гречушкин Данила Витальевич, студент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» электротехнического факультета ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». E-mail: dannickk@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СБОЕВ РАБОТЫ АВТОМАТИКИ ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА

Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

Николаев К.П., ООО «Релематика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В данной работе применяется метод обнаружения аномалий для определения сбоев работы автоматики дугогасящего реактора. В качестве алгоритма используется одноклассовая машина опорных векторов (OneClass SVM). Данный алгоритм справился с обнаружением смоделированных сбоев в работе реактора, что подтверждается проведёнными тестами.*

***Ключевые слова:** обнаружение аномалий, автоматика, дугогасящий реактор, машинное обучение.*

Введение

Для компенсации ёмкостных токов в сетях 6-35 кВ применяются дугогасящие реакторы (ДГР). ДГР представляет собой катушку индуктивности, индуктивность которой настраивается в резонанс с ёмкостью сети. Мерой компенсации ёмкостного тока служит расстройка. [1]

Цель автоматики управления ДГР – настройка индуктивности реактора таким образом, чтобы величина расстройки компенсации удовлетворяла требованиям [2]. При разработке новых алгоритмов настройки реактора становится всё сложнее отслеживать все возможные варианты развития событий, которые могут произойти в реальности, а, следовательно, и предсказывать появление сбоев в работе автоматики. Метод, предлагаемый в данной работе, может быть использован для контроля работы интеллектуального устройства, описанного в [3], а именно сигнализировать о появлении сбоев в работе или же о необходимости начала настройки.

Обнаружение аномалий

Обнаружение аномалий представляет собой поиск редких событий или наблюдений, которые отличаются от большинства данных. В задаче обнаружения аномалий нашли применения алгоритмы машинного обучения. Они восстанавливают модель

случайного распределения, из которого могли быть сгенерированы данные, и выделяют те данные, которые не характерны смоделированному распределению. Наиболее известные методы:

- Одноклассовая машина опорных векторов (One-Class SVM);
- Изолирующий лес (Isolation Forest);
- Эллипсоидальная аппроксимация данных (Elliptic Envelope).

В данной работе применяется одноклассовая машина опорных векторов [4]. Она представляет собой модель, которая описывает исследуемый класс. Также указывается вероятное количество выбросов в рассматриваемом наборе данных.

Для использования One-Class SVM необходимо сформировать выборку «нормальных» данных. Для этого составлена математическая модель работы реактора. Пример работы показан на рис. 1.

Смоделированы изменения значения расстройки за пределы диапазона $[-1,1]$ и процесс настройки реактора. Сплошной линией показано изменение истинного значения расстройки, жирными точками – измеренные значения расстройки (зашумленные значения истинной расстройки), тонкими точками – границы интервала $[-1,1]$.

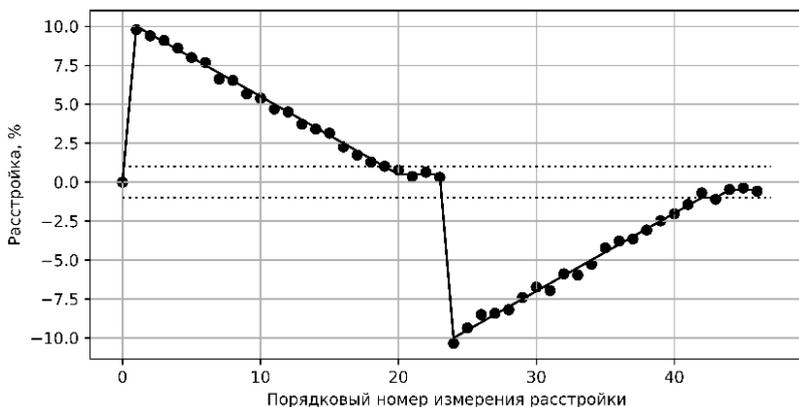


Рис. 1. Моделирование работы автоматики

В качестве признаков выбраны:

- величина изменения расстройки между двумя последовательными измерениями;

- команда автоматики, соответствующая текущему измерению расстройки:

- 0 – значение расстройки расположено внутри диапазона $[-1, 1]$, настройка реактора не требуется;

- 1 – значение расстройки превышает 1, наблюдается недокомпенсация. Необходимо увеличить ток реактора, чему будет соответствовать уменьшение значения расстройки;

- 1 – значение расстройки меньше -1, наблюдается перекомпенсация. Необходимо уменьшить ток реактора, чему будет соответствовать увеличение значения расстройки.

Необходимо отметить, что выбраны два признака лишь для наглядности работы алгоритма. По своей природе алгоритмы машинного обучения инвариантны к количеству признаков.

На рис. 2 показана выборка и результат работы алгоритма. Тёмная область соответствует нормальной работе автоматики, всё остальное – ненормальные режимы работы.

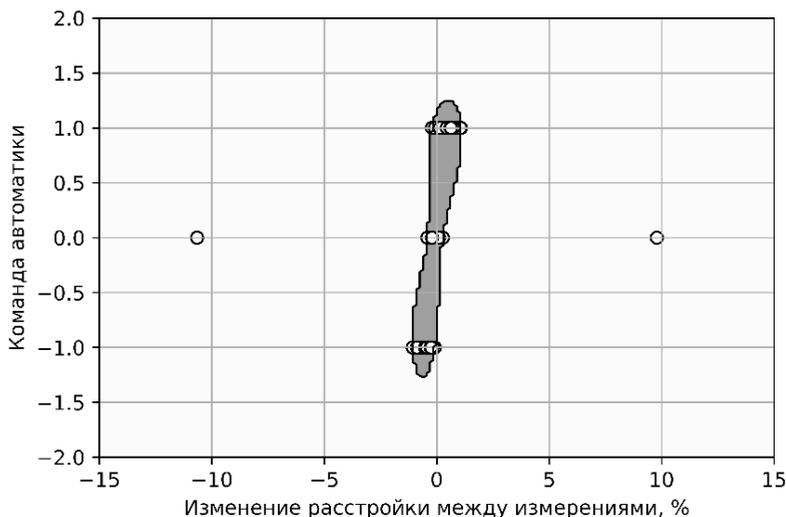


Рис. 2. Выборка и результат работы алгоритма

Тестирование

Для проведения теста смоделированы сбои в работе реактора. Моделируются две ситуации:

Автоматика работает верно, но измерения расстройки сильно зашумлены, поэтому автоматика не способна работать нормально (рис. 3).

Автоматика работает неверно: перепутаны команды «увеличить ток реактора» (команда 1) и «уменьшить ток реактора» (команда 2) (рис. 4).

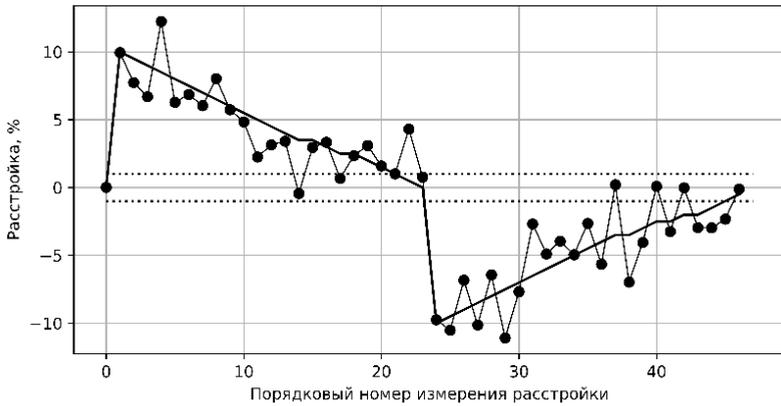


Рис. 3. Моделирование первого теста

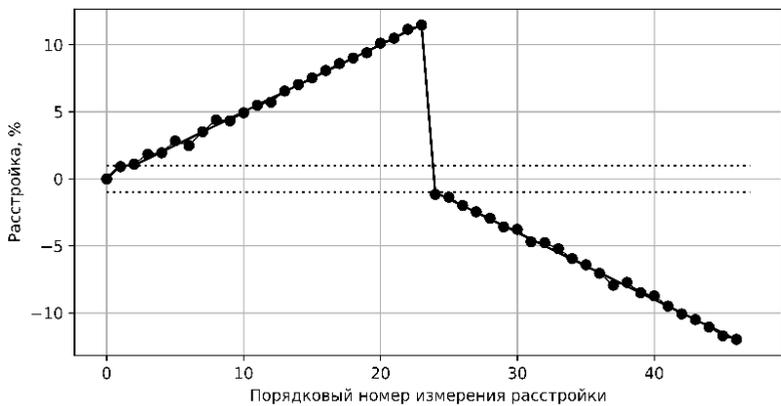


Рис. 4. Моделирование второго теста

Результаты работы алгоритма обнаружения аномалий показаны на рис. 5 и рис. 6. Чёрными точками – действия, которые алгоритм определил, как аномалии, белые – действия, соответствующие нормальной работе автоматики. Как видно, алгоритм отклассифицировал, что большинство измерений во время тестов считались аномальными, что соответствует моделируемым ситуациям.

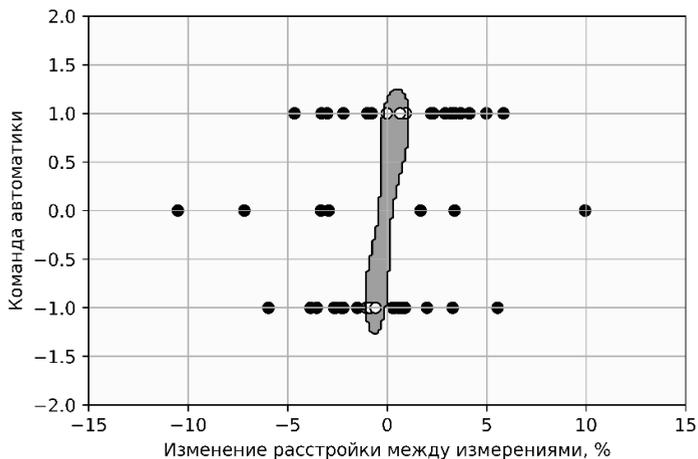


Рис. 5. Результаты на первом тесте

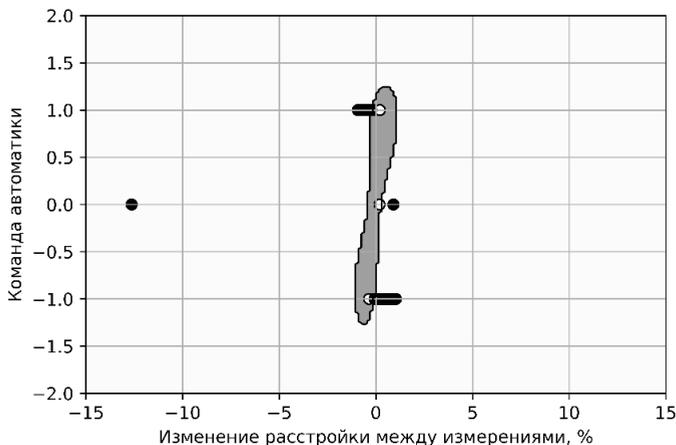


Рис. 6. Результаты на втором тесте

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения для обнаружения аномалий позволяет находить сбои в работе реактора, например, одноклассовая машина опорных векторов.

В качестве информации о действиях автоматики были выбраны два ключевых признака: изменение значения расстройки между двумя последовательными измерениями и команда автоматики. Для улучшения качества определения сбоев необходимо воспользоваться большим количеством признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ванштейн Р.А.* Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учеб. пособие / Р.А. Ванштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.

2. СТО 34.01-3.2-008-2017 Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35кВ. Общие технические требования. Стандарт организации ПАО «Россети».

3. *Дементий Ю.А., Шорников Е.В.* Совершенствование методов и алгоритмов настройки плунжерных ДГР: обзор методов и постановка задачи // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 255–261.

4. *Schölkopf B., Platt J.C., Shawe-Taylor J., Smola A., Williamson R.C.* Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution // Neural Computation, 13 – 2001 – pp. 1443-1471.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com

Николаев Кирилл Петрович, студент факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: nikolaev.kirill.p@mail.ru.

ТРЕХУРОВНЕВЫЙ КОНВЕРТОР ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Быков К.В., Павлов Ю.В., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Лазарева Н.М., ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Рассматривается DC-DC преобразователь для питания систем телекоммуникаций станций и подстанций, приводятся имитационная модель и временные диаграммы токов и напряжений однофазного трехуровневого конвертора.*

***Ключевые слова:** трехуровневый конвертор, имитационное моделирование в Simulink, диаграммы токов и напряжений.*

Устройства релейной защиты и автоматики, элементы систем управления, телекоммуникации и связи, входящие в систему собственных нужд станций и подстанций, являются приемниками электроэнергии, электроснабжение которых осуществляется либо от сети переменного тока через преобразовательные устройства силовой электроники, либо от независимого источника энергии – аккумуляторной батареи. Стремительное развитие цифровизации экономики требует получения все более полной и оперативной информации, в связи с чем развитие систем телекоммуникации станций и подстанций является актуальной задачей. Расширение функций и увеличение мощностей телекоммуникационного оборудования требует разработки источников постоянного напряжения, обладающих высокими энергетическими показателями. Выполнить стабилизацию напряжения, обеспечить требуемый уровень пульсаций при высоком КПД источника питания позволяет трехуровневый преобразователь [1–3]. Инверторы напряжения, выполненные по трехуровневой схеме, применяются в источниках, работающих на высокой частоте коммутации силовых ключей, когда важным становится обеспечение режима переключений транзисторов при нуле напряжения и нуле тока, улучшающего их динамические характеристики. Одним из возможных схемотехнических решений такого преобразователя является трехуровневый инвертор с неуправляемым выпрямителем на выходе, принципиальная схема

которого представлена на рис. 1. В настоящее время трехуровневые инверторы активно развиваются и при высоком питающем напряжении представляют собой реальную альтернативу мостовым преобразователям.

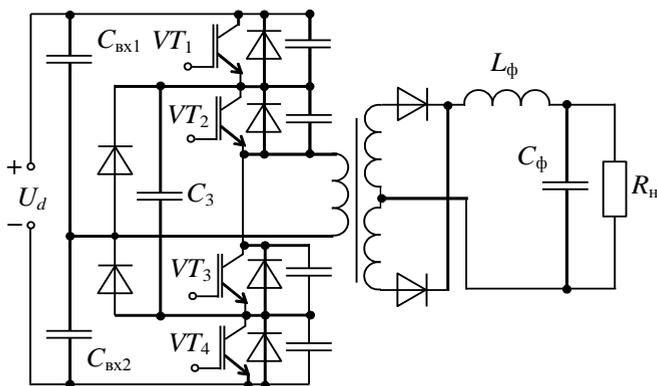


Рис. 1. Однофазный DC-DC преобразователь напряжения с трехуровневым инвертором

В рассматриваемом инверторе (рис. 1) цепь коммутации сформирована из четырех IGBT-транзисторов с обратными диодами. Ток одновременно протекает через два последовательно включенных транзистора, что увеличивает потери проводимости по сравнению с двухуровневым исполнением инвертора. Но в трехуровневой схеме можно применить транзисторы, рассчитанные на более низкое напряжение, кроме того, существенное снижение потерь переключения позволяет уменьшить общее значение рассеиваемой мощности примерно на 40 % [4], и это достоинство особенно ярко проявляется на высоких частотах коммутации.

Simulink-модель трехуровневого конвертора представлена на рис. 2 [5].

Конвертор выполняет преобразование постоянного напряжения 536 В в постоянное 48 В и обеспечивает в нагрузке ток 120 А. При фазосдвигающем управлении MOSFET транзисторы инвертора переключаются с частотой 100 кГц с коэффициентом заполнения, близким к 50 %. Показания приборов на рис. 2 свидетельствуют о неравномерной загрузке транзисторов: средние

значения токов «внутренних» ключей Mosfet2 и Mosfet3 15,7 А, что на 4 А больше токов транзисторов Mosfet1 и Mosfet4. Следовательно, в системе управления необходимо предусмотреть периодическую попарную смену транзисторов.

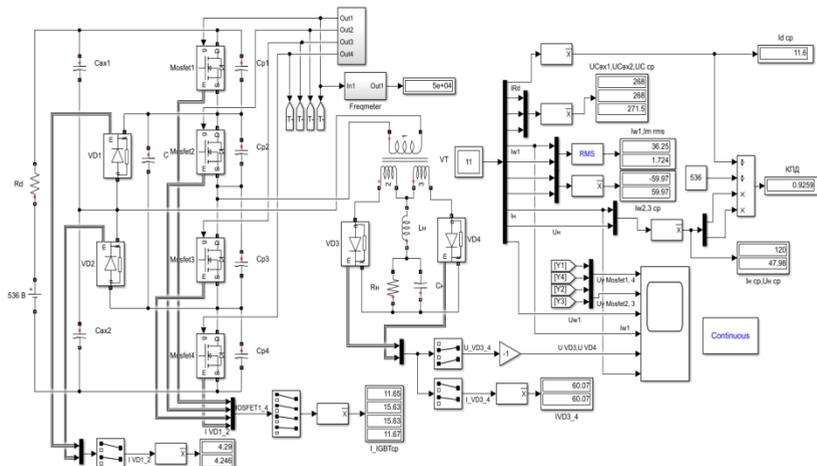


Рис. 2. Simulink-модель конвертора

Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя, полученные имитационным моделированием в Simulink Matlab, показаны на рис. 3.

Сдвиг фаз управляющих сигналов для MOSFET1 и MOSFET2 ($U_{yMosfet1}$ и $U_{yMosfet2}$ показаны на рис. 3 сплошными линиями) или MOSFET3 и MOSFET4 ($U_{yMosfet4}$ и $U_{yMosfet3}$ показаны пунктирными линиями) определяется длительностью рабочего периода. Осциллограмма тока нагрузки, приведенная на рис. 3 в нижнем окне, демонстрирует практически неизменное значение I_n . При заданных параметрах силовой части КПД конвертора 92,6 %.

В [6] представлено большое число различных модификаций трехуровневых преобразователей, причем на лабораторных образцах было достигнуто значение КПД 95–96 % при мощности в нагрузке 6 кВт, токе нагрузки 100 А и частоте преобразования 100 кГц.

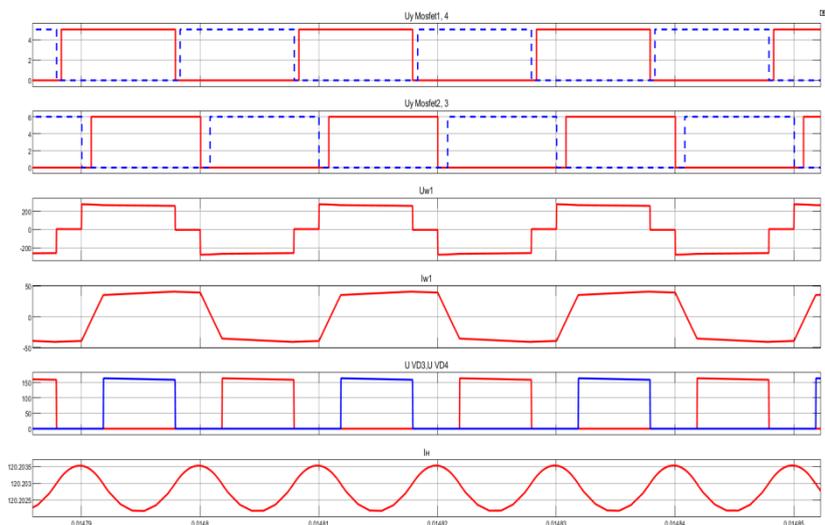


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов конвертора

Заключение

Использование трехуровневого инвертора, несмотря на кажущееся сложным схемотехническое решение, обеспечивает лучшие технико-экономические показатели высокочастотных преобразователей, применяемых в источниках питания с высокими требованиями стабильности выходных напряжения и тока. Основными достоинствами трехуровневых преобразователей являются меньшие перенапряжения и возможность реализации режима мягкого переключения транзисторов, что позволяет получить высокий КПД источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Исаков М.С.* Трехуровневый преобразователь, работающий с переключением при нуле напряжения // Практическая силовая электроника, 2007. – № 26. – С. 15–20.
2. *J. Renes Pinheiro and Ivo Barbi.* The Three-Level ZVS PWM Converter-a New Concept in High-Voltage DC-to-DC Conversion. IEEE IECON Record 1992, pp. 173–178.
3. *Быков К.В.* Трехуровневый транзисторный преобразователь с питанием от трехфазной сети / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров // 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.* Трехуровневые инверторы: теория и практика / А. Колпаков, И. Стаудт // Силовая электроника. – 2014. – № 5. – С. 42–48.

5. *Лазарева Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

6. *Canales F.* Novel DC-DC converters for high-power distributed power systems. Dissertation for degree of doctor of philosophy in electrical engineering. Virginia Polytechnic Inst, and State Univ, 2003.

Авторы:

Быков Константин Владимирович, заместитель заведующего отделом НКУ ООО НПП «ЭКРА», окончил Чувашский государственный университет в 1999 году. E-mail: bykov_kv@ekra.ru.

Лазарева Надежда Михайловна, доцент кафедры промышленной электроники Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова, кандидат технических наук, доцент. Окончила факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета 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.

Павлов Юрий Валерианович, руководитель направления модульных ЗПУ отдела НКУ ООО НПП «ЭКРА», окончил Чувашский государственный университет в 1992 году. E-mail: pavlov_yv@ekra.ru.

УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЦЕХОВОЙ СЕТИ ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ВЕНТИЛЯМИ

Кинев Е.С., ООО Тепловые электрические системы,
г. Красноярск, Россия

**Тяпин А.А., Хороших А.А., Колодочкин М.Д., Пантеле-
ев В.И.**, ФГОУ ВО Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

***Аннотация.** Рассмотрены причины ухудшения электромагнитной совместимости цеховой распределительной сети металлургического предприятия с мощными вентиляльными регуляторами. Предложены способ и средство улучшения электромагнитной обстановки, посредством применения цифровой микроконтроллерной системы управления тиристорными регуляторами. Задача решается за счет точной коммутации вентиля каждой фазы в момент перехода через нуль. Это позволяет снизить уровень высших гармоник тока и напряжения в распределительной сети, а также повысить устойчивость работы оборудования.*

***Ключевые слова:** трехфазная распределительная сеть, вентиляльный регулятор, микроконтроллерное управление, электромагнитная совместимость, высшие гармоники.*

На металлургических предприятиях, в миксерах с расплавом алюминия, используется технологический нагрев тепловыми электрическими нагревателями (ТЭН). Управление температурным режимом расплава алюминия осуществляется с помощью вентиляльных регуляторов [1]. В системе управления трехфазных тиристорных модулей используется фазоимпульсное регулирование. В сетях ограниченной мощности актуальным становится снижение взаимного влияния работы соседних агрегатов [2]. В тяжелой электромагнитной обстановке, нередко возникает необходимость модернизации производства [3]. Эффект ухудшения электромагнитной совместимости (ЭМС) особенно ярко проявляется при работе установок с фазоимпульсным регулированием температуры мощных нагревателей миксеров копильников и транспортных лотков для расплава алюминия [4]. Режимные характеристики фазовых регуляторов в сети 0,4 кВ должны обеспечивать мегаваттные мощности потребления, при токах в 1-2 кА при низких значениях коэффициента мощности.

Упрощенная схема электроснабжения литейного каскада из двух пар миксеров М1-М2 и М3-М4 показана на рис. 1. Распределительное устройство 0,4 кВ предусматривает резервирование с применением АВР. В цеховой подстанции использовано два масляных трансформатора мощностью по 1600 кВА, на напряжении 10/0,4 кВ, с глухо заземленной нейтралью. Поскольку в литейном каскаде использовано сразу 4 миксера, для распределения значительных токов, применены достаточно мощные комплектные шинопроводы ШМА4-1250-44-1ТЗ на токи, величиной не менее 1250 Ампер.

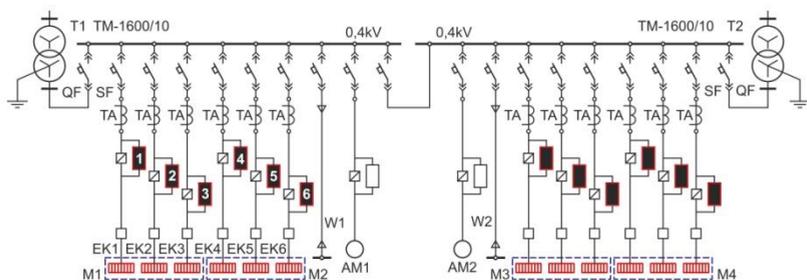


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения миксеров

Каждая система шин питает тиристорные модули 1-2-3 и 4-5-6 каждый из которых регулирует температурный режим отдельной зоны (I-II-III) миксера копильника М1 и (IV-V-VI) раздаточного миксера М2. В каждом агрегате предусмотрено три рабочие зоны. Например, в зонах нагрева I-II-III, установлены ТЭНы ЕК1-ЕК2-ЕК3 мощностью по 150 кВт. При этом суммарная мощность электрических обогревателей каждого миксера составляет 450 кВт. Остальные локальные электроприемники, на каждой системе шин, менее существенны, и их суммарная мощность не превышает 50 кВт.

Необходимо отметить, что цеховая планировка выполнена достаточно компактно. Однако, не смотря на это, суммарная протяженность каждой кабельной линии между распределительный устройством и электронагревателем миксера, с учетом ответвления в ПСУ тиристорных регуляторов составляет 80-110 метров. Оборудование литейного каскада невозможно разместить иным образом, поскольку есть требования технологии

производства. Поэтому в эквивалентной схеме замещения присутствуют ощутимые продольные резистивные компоненты сопротивлений линий (порядка 50-100 мОм), для алюминиевых кабелей АВВГ 4×185. Указанные компоненты, наряду с погонной индуктивностью, создают значимые величины продольных напряжений для целого спектра гармоник тока регуляторов.

Показатели качества электроэнергии технологической электросети страдают от несовершенства технологии управления переключением мощных вентиляей, обусловленной схмотехникой модуля синхронизации задающего звена контроллера [5]. Как правило, его выполняют в виде схемы детектора перехода через ноль по каждой из трех фаз. Такой подход обоснован при бытовом применении для регулировки потребителей небольшой мощности. Однако, при одновременной работе в магистрали мощных нагрузок, с несинусоидальностью токов свыше 40 % при слабой сети подводящих алюминиевых кабелей, появляются провалы напряжения в момент закрытия тиристоров [6]. Импульсные помехи в одной фазе, в силу связности линий питания через силовой трансформатор, приводят к импульсным выбросам в других фазах и агрегатах, подключенных к распределительной сети [7]. Это приводит к резкой несинусоидальности напряжений (свыше 12 %) при явно выраженных знакопеременных производных по напряжению и току.

Насыщение сети высшими гармониками приводит к ошибке при определении истинного момента перехода через ноль, и, как следствие, – к несвоевременному формированию импульса отключения силового тиристора. Этот эффект проявляется как постоянный шум при измерении тока нагрузки при неизменном управляющем сигнале на регуляторе. Рассогласованные управляющие воздействия приводят к ошибкам в работе соседних агрегатов и возникновению аналогичных помех. Указанная проблема чревата авариями для оборудования, работающего на пределе расчетных режимов [8].

Проблема устойчивости сети усугубляется большими реактивными токами, несмотря на резистивную нагрузку. Это приводит к дополнительным потерям, нагреву проводов, эмиссии электромагнитных помех, влияющих на все электроприемники и измерительное оборудование цеха. В результате воздействия

перечисленных факторов, системы автоматического регулирования могут давать ошибочные команды исполнительным механизмам и устройствам. Поддержание элементов распределительной сети в работоспособном состоянии, требует комплекса мер не только по компенсации реактивных мощностей и симметрированию режимов, но также по защите измерительных и сигнальных цепей от импульсных помех [9].

Одним из способов противодействия ухудшению ЭМС цеховой сети с вентильными регуляторами является создание цифрового микроконтроллерного модуля управления мощной нагрузкой. Работа модуля основана на цифровой обработке сигналов, точно идентифицирующей моменты перехода сетевого напряжения через ноль. Пример структурной схемы разработанного микроконтроллерного устройства показан на рис. 1.

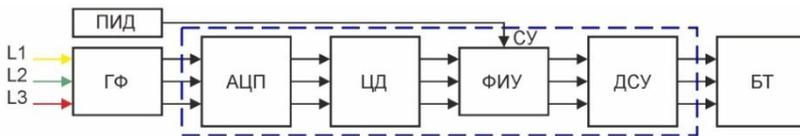


Рис. 2. Структурная схема контроллера тиристоров

В схеме контроллера трехфазный входной сигнал напряжения проходит гармонический фильтр ГФ и преобразуется с помощью АЦП в цифровые отсчеты. В цифровом детекторе ЦД, методами дискретной математики выполняется обработка сигналов в реальном времени, выделяется сигнал синхронизации, который является аналогом сигнала перехода через ноль. Контроллер запускает формирователь импульсов управления (ФИУ), сочетая в алгоритме сигналы управления (СУ) от внешнего устройства, например от ПИД-регулятора. Синтезированное воздействие усиливается драйвером сигналов управления (ДСУ) контроллера и поступают в блок тиристоров (БТ).

Исследование взаимодействия аппаратных модулей и алгоритмов работы устройства проведено в программной среде платформы моделирования ISIS Proteus v.7. В качестве микропроцессорного средства применен целевой микроконтроллер ATmega8. Разрядность 8 бит, ОЗУ 1024 байт, ПЗУ 8192 байт. При построении устройства использованы оригинальные про-

граммно-аппартные решения и схемотехника. Для удобства замены устаревших блоков на модифицированные, приняты такие же, конструктивные и технологические решения, как в серийном промышленном оборудовании.

Заключение. Результаты моделирования, макетирования и разработки опытно-промышленного образца устройства показали надежность аппаратного оснащения, а также точность и достоверность алгоритмов управления силовыми тиристорными сборками разной мощности. Испытание устройства проведено на металлургических миксерах сопротивления емкостью 50 тонн в комплекте с модулями ПНТТ-630. Долговременно выдерживались токи свыше 400 ампер. Кроме того, управляющий контроллер испытан на системах обогрева транспортных лотков, для расплава алюминия, при токах до 180 ампер. Изделие показало значительно более надежную и устойчивую работу в сравнении со стандартными модулями БУСТ-2 (Овен) в крайне сложной электромагнитной обстановке металлургического цеха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тяпин А.А., Кинев Е.С. Система электропитания МГД-перемешивателей расплава алюминия с IGBT-инверторами // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. IV Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 190-195. DOI: 10.51932/9785907271739_190.

2. Тяпин А.А., Кинев Е.С. Постановка задачи анализа электромагнитной совместимости МГД-перемешивателей расплава алюминия. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 8, 2021. с. 41-49. ISSN: 2074-9635.

3. Kinev E.S., Tyapin A.A., Litovchenko A.V. Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. The scientific heritage. Budapest, 2020. No 49-1, Vol. 1. pp. 69-74. ISSN 9215-0365.

4. Головенко Е.А., Литовченко А.В., Тяпин А.А., Кинев Е.С. Электрооборудование для транспортировки жидкого алюминия. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 8, 2019. с. 43-55. ISSN: 2074-9635.

5. Williams B.W. Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components. Glasgow. United Kingdom, 2006, 1432 p. ISBN: 978-0-9553384-0-3.

6. The Industrial Electronics Handbook. Power electronics and motor drives. B.M. Wilamowski and J.D. Irwin edition. Taylor and Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York. USA, 2011, 974 p.

7. Кинев Е.С., Тяпин А.А., Пантелеев В.И., Первухин М.В., Литовченко А.В. Динамика параметрических ШИМ-моделей индукционных устройств. В кн.: Сборник материалов конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2021) 4 июня 2021. Чебоксары: ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». С. 107-111.

8. Kinev E., Tyapin A., Panteleev V., Pervukhin M. Application of analog phase splitting in induction device simulation systems. The Scientific Heritage. 2021. № 65-1 (65). pp. 56-66.

9. Tyapin A.A., Panteleev V.I., Kinev E.S., Efimov S.N., Bezhitsky S.S. Binary control characteristics of resistive models of the induction devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021) 29th-30th April 2021, Krasnoyarsk, Russian Federation. 1155 012044. <https://doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012044>.

Авторы:

Кинев Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор ООО Тепловые электрические системы. Закончил электромеханический факультет Красноярского политехнического института в 1985 году. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Индукционные установки сквозного нагрева алюминия в продольном магнитном поле» в 2006 году.

Тяпин Алексей Андреевич, аспирант ФГОУ ВО Сибирского федерального университета. Закончил электромеханический факультет Красноярского политехнического института в 2003 году.

Хороших Алексей Анатольевич, аспирант ФГОУ ВО Сибирского федерального университета. Закончил радиотехнический факультет Красноярского политехнического института в 1999 году.

Колодочкин Матвей Денисович, аспирант ФГОУ ВО Сибирского федерального университета. Закончил электромеханический факультет Политехнического института СФУ в 2019 году.

Пантелеев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики ФГОУ ВО Сибирского федерального университета. Закончил электротехнический факультет Томского политехнического института в 1970 году. Докторскую диссертацию на тему «Электроприводы переменного тока в прецизионных следящих системах» защитил в 1993 году.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ КАБЕЛЬНОЙ СЕТЬЮ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО- ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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

***Аннотация.** Показано, что наиболее перспективным для разработки универсальных средств почасового прогнозирования «на сутки вперед» является использование искусственных нейронных сетей. Показана необходимость наличия интеллектуальных узлов в киберфизической системе (КФС) мониторинга и прогнозирования термодинамических процессов в силовых кабельных линиях (СКЛ). Исследования по КФС направлены на создание в нашей стране «умных систем», способных функционировать в условиях цифровой экономики и обладающих новыми производственными технологиями. Предложена архитектура КФС прогнозирования ресурса СКЛ с использованием методов нейросетевого (НС) прогнозирования термических процессов СКЛ в условиях эксплуатации. Проведены экспериментальные исследования предлагаемого метода, а именно разработан алгоритм и выполнено прогнозирование термических процессов в изоляции СКЛ от тока нагрузки. Предлагаемая искусственная НС может быть использована для составления прогноза температурного режима токоведущей жилы, на сутки вперед с точностью до 2,5% от фактического значения температуры жилы. В статье рассмотрена структура системы мониторинга и прогнозирования СКЛ с позиций киберфизической системы.*

***Ключевые слова:** киберфизические системы, прогнозирование пропускной способности, электроизоляционные материалы.*

Введение

Устойчивое функционирование электросетевого комплекса невозможно без надежной и качественной работы распределительных электрических сетей 6–10/0,4 кВ, которые являются завершающим звеном в системе обеспечения потребителей электрической энергией и находятся в непосредственном взаимодействии с конкретным потребителем [1–3]. Большое значение приобретает внедрение систем широкомасштабного мониторинга режимов и управление интеллектуальной энергетической системой (ИЭС) на основе современных интеллектуальных

информационно-коммуникационных технологий, средств и технологий измерений, передачи, обработки и представления информации.

При эксплуатации изоляция силовых кабельных линий (СКЛ) подвергается различным видам воздействий, среди которых: тепловое, электрическое, химическое, механическое, атмосферное и т.д [4]. В результате изоляция СКЛ претерпевает изменения электрических свойств, вследствие чего несколько изменяются технические характеристики её изоляционных материалов [3, 5]. Одной из важнейших характеристик СКЛ в системе электроснабжения является их нагрузочная способность, которая определяется тепловым режимом, по величине нагрузочной способности. На этапе проектирования необходимо производить расчет и учитывать величину пропускной способности СКЛ. Несмотря на обилие различных методик для прогнозирования нагрузок нет возможности учесть все тонкости, которые оказывает температурный режим работы СКЛ [7, 8]. Решить данную проблему можно, если прибегнуть к мониторингу температуры кабеля в процессе его работы. Метод искусственных нейронных сетей (ИНС) считается наиболее перспективным из них. Существующие методы управления процессом организации вычислений в рамках кибер-физической системы (КФС) не обеспечивают достаточную эффективность в условиях высокой структурной сложности задач. Не менее важным вопросом является проблема обработки больших потоков данных, которая кроме самих объемов информации создает так же значительное количество связей. КФС включают мониторинг, системы управления технологическими процессами. К проблемам применения КФС можно отнести разработку новых математических методов. К ключевым недостатком существующих систем обеспечения надежности можно отнести отсутствие эффективного прогнозирования инцидентов и событий, возникающих в процессе функционирования инфраструктуры КФС. Существующие системы не в полной мере используют возможности самообучения на основе имеющихся данных о состояниях объектов инфраструктуры. Что связано с недостаточно эффективной работой систем мониторинга.

Таким образом, для решения задач мониторинга и прогнозирования пропускной способности СКЛ необходимо создание кибер – физических моделей (КФМ), в которых одновременно моделируются как работа прогнозирования пропускной способности СКЛ, так и термофлуктуационных процессов в ней. Структурная схема разрабатываемой КФС представлена на рис. 1.

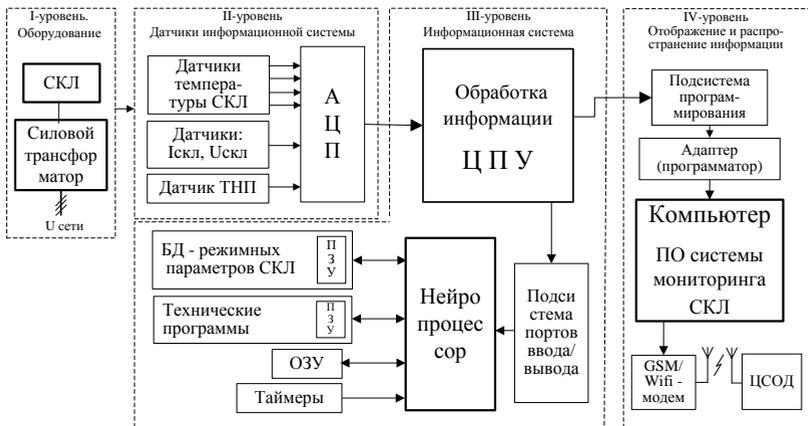


Рис. 1. Структура кибер-физической системы мониторинга и прогнозирования СКЛ

Структурная схема КФС (рис. 1) представляет собой реализацию информационно-технологической концепции по интеграции вычислительных ресурсов в электро-энергетическую сеть. КФС организована как многоуровневая комплексная система, состоящая из аппаратных, вычислительных и физических элементов, которая непрерывно получает данные о режимных параметрах силовой кабельной сети электроснабжения потребителей, и использует их для дальнейшей оптимизации процессов управления пропускной способностью СКЛ. Отказ элемента физической подсистемы может привести к аварийному состоянию электрической части и способствовать выходу из строя системы управления информационно-коммуникационной подсистемы. Она интегрирует способности к вычислениям, связи и хранению информации с мониторингом работы СКЛ в реальном времени и

управлением системой кабельных линий для обеспечения эффективного, надежного и безопасного электроснабжения потребителей. В ней физические и программные компоненты тесно взаимосвязаны. Отличительной особенностью кибер-физической системы является значительный объем обрабатываемых данных ($U_c, I_c, I_{\text{тип}}, T_{\text{о.с.}}$, ТСКЛ, и т.д.). Этот факт потребовал разработки иных подходов к организации архитектуры всех ключевых элементов разрабатываемой КФС. И так КФС (рис. 1) представляет собой многоуровневую вычислительную платформу с множеством взаимосвязанных элементов таких как:

- физические (трансформаторы, СКЛ, выключатели и т.д);
- аппаратные (датчики тока, напряжения, температуры, и др.);
- информационную систему в которую входит база данных (поиск и обработка данных), устройства обработки информации.

Обработанная информация поступает на компьютер, имеющий доступ к сети либо по wifi-сети, либо по GSN-сети. Информация записывается на локальный диск, и далее (через сеть с коммутацией пакетов Ethernet, настроенную специальным образом) отправляется в центр сбора и обработки данных автоматизированной системы управления технологическим процессом энергоснабжающей организации. Это позволит отслеживать и управлять участками энергосети, поддерживая показатели качества электроэнергии на заданном уровне. При этом управление элементами КФС может осуществляться как конечным пользователем, так и интеллектуальными алгоритмами.

Для решения задачи управления такой структурой CPS необходимо располагать актуальной информацией о текущем состоянии и желательно о будущем состоянии наблюдаемой CPS. Такая информация может быть получена посредством реализации процедуры мониторинга.

В ходе решения поставленной задачи были проанализированы основные типы искусственных нейронных сетей (НС). Эффективность работы нейросети определялась по среднеквадратичной ошибке. Результаты сравнение типов НС представлены в таблице.

Результаты сравнения НС

Тип нейронной сети	Ошибка прогноза	
	ε , °С	ε , %
Многослойный персептрон	0,9	2,3%
Рекуррентная нейронная сеть	1,2	2,5%
Каскадная сеть прямого распространения	1,63	4,2%
Сеть Эльмана	2,14	5,3%
Сеть с запаздыванием и обратным распространением ошибки	2,75	7,4%

Анализ результатов сравнения НС показал, что наименьшую ошибку прогноза имеет многослойный персептрон.

Выводы

Для прогнозирования температурных режимов СКЛ была разработана искусственная нейросеть для определения текущего температурного режима для токоведущей жилы силового кабеля. Проверка результатов прогнозирования термофлуктуационных процессов в СКЛ показала, что средняя ошибка прогноза температуры жилы кабеля $\theta_{ж}$ при различных токах жилы не превышает 3 %, что свидетельствует о возможности применения метода искусственных нейронных сетей для целей прогнозирования температуры жилы кабеля по температуре на поверхности $\theta_{з.о.}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. / Санкт-Петербург, 2017. Сер. Учебники для вузов. Специальная литература (Издание третье, стереотипное).

2. Полуянович Н.К. Энергетическая электроника. Пособие по решению задач и методические указания / Таганрогский радиотехнический университет, Кафедра теоретических основ электротехники. Таганрог, 2001.

3. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуяно-

вич; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с.

4. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable. В сборнике: Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012. 2012. С. 418-422.

5. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пшихопов В.Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов. Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17. № 3 (90). С. 117-127.

6. Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S. The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development. В сборнике: Proceedings of x international SAUM conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010). 2010. С. 265-269.

7. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 25.

8. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2. Сер. "2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies, AMRMT 2017" 2017. С. 012036.

Авторы:

Полуянович Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЭиМ, ЮФУ. Окончил факультет микроэлектроники и электронной техники Таганрогского радиотехнического института. 1991 году получил ученую степень кандидата технических наук, защитил диссертацию по теме «Эквивалентные преобразования в линейных и нелинейных схемах замещения электрических цепей». E-mail: nik1-58@mail.ru.

Дубяго Марина Николаевна, старший преподаватель кафедры ЭиМ, ЮФУ. Окончила естественно-гуманитарный факультет, ЮФУ. E-mail: w_m88@mail.ru.

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Попов С.О., Антонов А.С., Южаков В.Ю., Захарова Е.В.,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Ве-
ликого, г. Санкт-Петербург, Россия

***Аннотация.** Функциональная стабильность быстродействующих алгоритмов релейной защиты и автоматики в значительной степени зависит от динамических свойств преобразователей тока и напряжения. Это вызывает необходимость тестирования устройств управления электроэнергетических систем в условиях возможных искажений измерений, которые во многом определяются свойствами сердечников электромагнитных трансформаторов. В данной работе предлагается метод создания модели электромагнитного преобразователя на основе снятого семейства симметричных циклов перемагничивания.*

***Ключевые слова:** диагностический комплекс, электромагнитный преобразователь, циклы перемагничивания, гистерезис, насыщение.*

Введение

Для оценки поведения защиты в условиях переходных процессов необходимо учитывать такие свойства магнитных материалов как гистерезис, вихревые токи, остаточная намагниченность, магнитная анизотропия, насыщение. Пренебрежение одним из этих явлений может существенно отразиться на достоверности полученных при моделировании результатов. При этом существует достаточно много способов моделирования электромагнитных преобразователей [1-4], однако, ни одна из существующих моделей не претендует на абсолютную достоверность. При этом необходимость эмпирического определения магнитных свойств материала каждого образца затрудняет применение многих существующих моделей и делает востребованными модели, основанные на ранее экспериментально полученных характеристиках намагничивания и поэтому лишенных этого недостатка. Так, в работе [5] на основании симметричных и несимметричных циклов перемагничивания выполняется расчет переходного процесса трансформатора тока на основании графоаналитического метода выбора кривых намагничивания с учетом правил Маделунга [6] и последующего численного рас-

чета дифференциального уравнения. Данная работа посвящена автоматизации указанного подхода к моделированию и его усовершенствованию при применении численных методов решения дифференциальных уравнений, методов обработки экспериментальных данных и аппроксимации полученных результатов при снятии симметричных и несимметричных циклов перемagnetизования экспериментально.

Расчет трансформатора тока по снятым симметричным циклам перемagnetизования

Проведение серии экспериментов на разных амплитудах первичного тока позволило получить симметричные циклы, представленные на рис. 1.

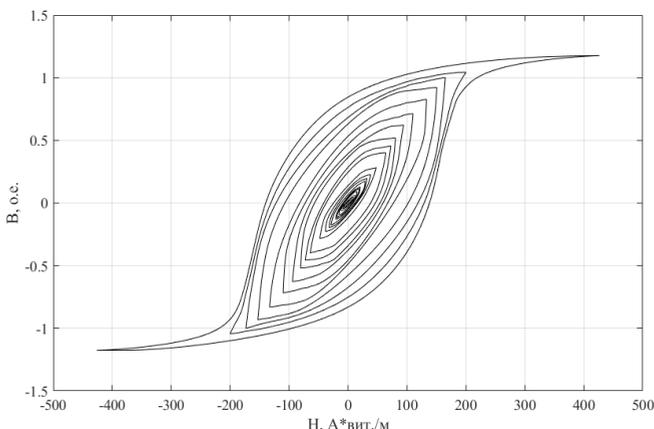


Рис. 1. Семейство симметричных циклов

Вычисление тока намагничивания и вторичного тока трансформатора тока выполнялось по данным физического образца и заданному первичному току [1]. Правильный расчет магнитной проницаемости μ_d требует определения кривой хода процесса намагничивания, т.е. определения зависимости $B = f(H)$ после каждой точки поворота до состояния глубокого насыщения в котором эта зависимость является однозначной. Результаты расчета точки поворота не будут совпадают с результатами эксперимента, поэтому даже в установившихся режимах необходимо выполнить расчет симметричных циклов.

Построение симметричного цикла выполнялось пропорциональным определением точек между двумя ближайшими циклами (рис. 2), а построение малых циклов в пределах наименьшего экспериментально взятого цикла выполнялось его пропорциональным масштабированием.

Наибольший практический интерес представляет построение несимметричных частных циклов, успешная реализация которых позволит воспроизводить процессы в трансформаторах тока в условиях переходных процессов. Использование некоторых правил Маделунга позволяет выполнить построение соответствующих частных циклов намагничивания (рис. 1-5):

1. Ход любой частной кривой $V = f(H)$ однозначно определяется точкой поворота, служащей началом для этой кривой. Важным следствием этого правила является тезис о том, что ни одна кривая не может выйти за пределы максимальной петли, что уже было неоднократно подтверждено на практике [5]. Пример такого построения приведен на рис. 2;

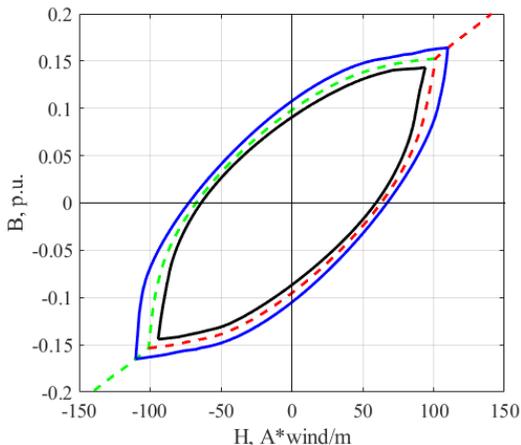


Рис. 2. Построение симметричного цикла

2. Если какую-нибудь точку кривой намагничивания симметричного цикла сделать точкой поворота, то определяемая ею новая частная кривая пройдет через предыдущую точку поворо-

та, то есть через вершину предыдущего симметричного частного цикла, и дальше пойдет по основной кривой намагничивания [5].

Особенности построения несимметричных частных циклов представлены на рис. 2-4. Построение частного цикла $F-y-B-t-F$ для процесса размагничивания, соответствующего кривой $B-t-A$ цикла $B-t-A-u-B$, показано на рис. 3.

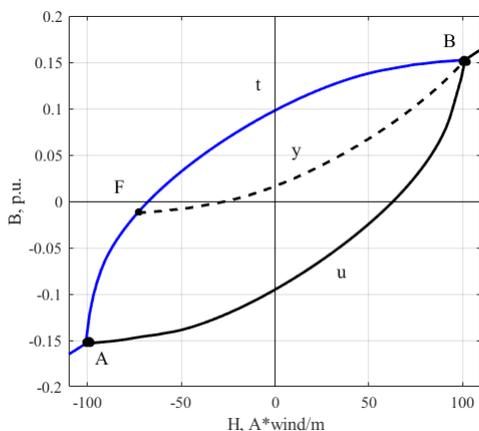


Рис. 3. Построение частного цикла, точка поворота F не выходит за предыдущий цикл $A-u-B-t-A$

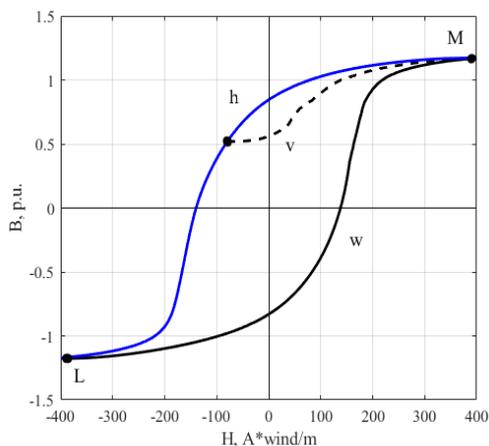


Рис. 4. Построение частного цикла в области насыщения

Построение кривой $F-y-B$ на рис. 3 выполнено путем двух последовательных зеркальных отображений относительно оси абсцисс и ординат и параллельного переноса кривой $B-t-F$ до совмещения с точками поворота цикла $F-y-B-t-F$. На рис. 4 показано аналогичное построение в области насыщения, кривая намагничивания $K-v-M$ цикла $K-v-M-h-K$ выполняется пропорциональным смещением кривой $L-w-M$.

Существует еще одно правило Маделунга, согласно которому все частные кривые, исходящие из разных точек с одинаковой индукцией B , имеющие одинаковый знак приращения, могут быть совмещены путем параллельного перемещения в горизонтальном направлении. Однако после реализации данного правила полученные практические результаты не подтвердили данный подход. Более того, правила Маделунга качественно описывают только построение несимметричного цикла, начало которого лежит на симметричном цикле. В случае если после первой точки поворота процесс намагничивания снова меняет знак, не достигнув вершины симметричного частного цикла, правила Маделунга уже оказываются недостаточными. Для этих процессов необходимо искать новую точку выхода на основную кривую намагничивания, которая лежит внутри первоначального симметричного цикла на котором произошел предыдущий поворот (рис. 5).

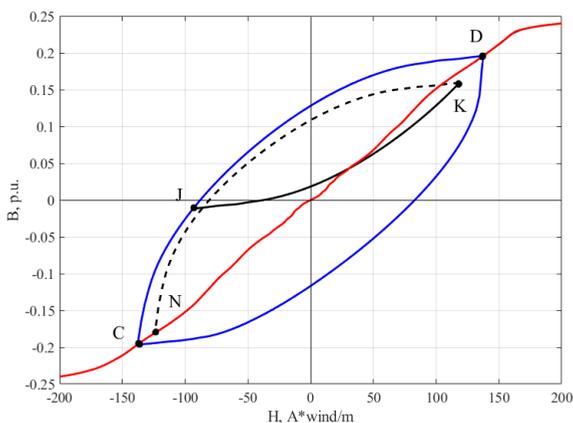


Рис. 5. Построение частного цикла, точка поворота G не выходит за пределы предыдущего частного цикла $I-a-E-q-I$ и не достигает основной линии намагничивания

Точка N на рис. 5, соответствующая новому симметричному циклу, может быть найдена пропорционально отношению работы, совершенной в процессе намагничивания от предыдущей до последней точки поворота $J-K$, к работе, которая была бы совершенна при прохождении от предыдущей точки поворота до вершины симметричного цикла $J-K-D$, в которую должен был прийти процесс намагничивания в соответствии со вторым правилом Маделунга.

Результаты моделирования

Наибольший интерес для средств релейной защиты представляет воспроизведение переходного процесса при коротких замыканиях, в процессе которых происходит существенное намагничивание материала и последующее снижение намагничивания материала. Пример такого процесса, полученного при моделировании, представлен на рис. 6. На графике присутствует заметное отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных, однако, погрешность моделирования при этом ниже, чем при моделировании только по основной кривой намагничивания. Первоначальное намагничивание материала при этом идет несколько ниже кривой полученной по вершинам симметричных частных циклов. Совершенствование данной модели предполагается провести в ходе дальнейшей научной работы.

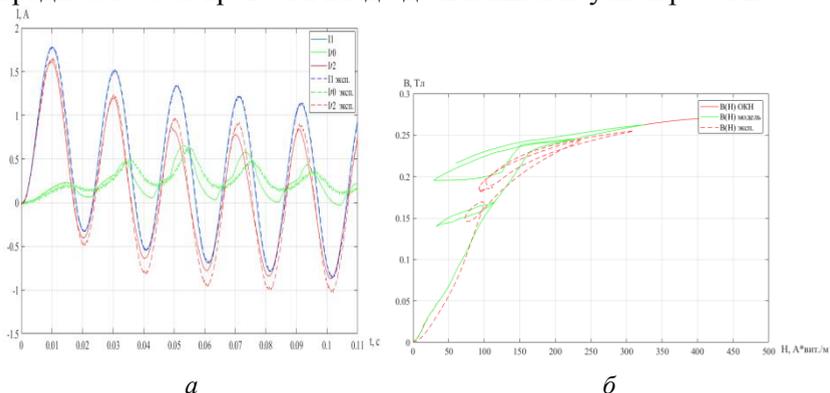


Рис. 6. *а* – Осциллограммы токов (сплошная линия – результаты расчета в модели, пунктирная линия – экспериментально снятые значения); *б* – Годограф начального процесса намагничивания КТ (сплошная линия показывает результат расчета модели, пунктирная линия – экспериментально взятые значения)

Выводы

Результаты анализа полученных осциллограмм токов и годографа процесса перемагничивания позволяют говорить об адекватности разработанной модели электромагнитного преобразователя. Предлагаемая модель не требует решения нелинейных дифференциальных уравнений и контроля их сходимости, что значительно экономит вычислительные ресурсы. Это основное достоинство разработанной модели позволяет использовать ее в диагностических комплексах реального времени для тестирования устройств управления электроэнергетическим оборудованием в условиях переходных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ambrosovskay T.D.* Improving the Reliability of the Relay Protection Measuring Circuits Power Stations / *Ambrosovskay T.D., Popov M.G., Popov S.O.* // – 2015. – № 11. – С. 30–35.

2. *W. Kanokbannakorn* Improvement of a Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory / *W. Kanokbannakorn, T. Penthong* // IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), 2019.

3. *Филимонов С.И.* Разработка имитационной модели петли гистерезиса в программном комплексе MatLab / *Филимонов С.И.* // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 2.

4. *Лебедев В.Д.* Исследование динамических процессов в измерительных трансформаторах тока и напряжения / *В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков* // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6.

5. *Сирота И.М.* Переходные режимы работы трансформаторов тока / *Сирота И. М.* // Акад. наук УССР. Ин-т электротехники. – Киев: Изд-во Акад. наук УССР, 1961. – 192 с., 1 л. граф.: черт.; 23 см.

6. *E. Madelung*, *Über die Magnetisierung Durch Schnellverlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Markonischen Magnetdetektors* / *E. Madelung* // *Annalen der Physik*, Bd 17, H. 5, S. 861, 1905.

Авторы:

Попов Станислав Олегович, кандидат технических наук, доцент ВШВЭ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Закончил электромеханический факультет Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в 2008 году. Дис. канд. техн. по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы на тему «Разработ-

ка методов и средств повышения эффективности дифференциальной защиты трансформаторов» защищена в 2012 году. E-mail: rorov_so@mail.ru.

Антонов Артем Сергеевич, закончил высшую школу высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в 2021 году. E-mail: artem.antonov.sergeev1997@mail.ru.

Южаков Валерий Юрьевич, закончил высшую школу высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в 2021 году.

Захарова Елена Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент ВШВЭ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Закончил электромеханический факультет Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в 2011 году. Дис. канд. техн. по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы на тему «Критерий экспресс-оценки статической устойчивости объединенных энергосистем» защищена в 2016 году. E-mail: z_e_zakh@mail.ru.

ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ ПО МЭК 61850: ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД, ПРЕИМУЩЕСТВА ЦПС

Галанина Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Петров С.В., АО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. *Объектно-ориентированный подход в разработке современных промышленных технологий на примере цифровой подстанции в электроэнергетике. МЭК 61850 как совокупность принципов ООП для построения сложных иерархических систем. Преимущества ЦПС от реализации простой функции релейной защиты и обеспечения ее функционирования до интеграции отдельной подстанции в энергосистему региона.*

Ключевые слова: *МЭК 61850, цифровая подстанция, объектно-ориентированный подход, электроэнергетика.*

С момента возникновения электроэнергетики как отрасли и до наших дней происходит непрерывный процесс ее трансформации. В наши дни мы являемся участниками трансформации

электроэнергетики и внедрения в промышленную эксплуатацию одной из самых передовых технологий – МЭК 61850.

Широкое применение микропроцессорных устройств в электроэнергетике продемонстрировало возможность недорогого и существенного повышения качества функционирования энергообъектов. Обратной стороной этого процесса стало порождение ряда значительных проблем, усложняющих процесс эксплуатации энергообъектов. МЭК 61850 стал следствием применения микропроцессорных устройств и ответом на свои-ственные этим решениям проблемы.

Первая версия МЭК 61850 появилась в 2003 году и на сегодняшний день имеет финальную версию, включающую итоги работы профессионального сообщества за почти 20 лет.

По своей сути МЭК 61850 является объектно-ориентированной технологией. МЭК 61850 описывает абстрактные модели функций релейной защиты и автоматики, устройств, их поведение, взаимосвязи между экземплярами сущностей и интерфейсы обмена информацией между экземплярами сущностей. При этом МЭК 61850 не регламентирует никаких требований к основному функционалу ЦПС – функциям релейной защиты и автоматики.

Основой технологии МЭК 61850 можно считать декомпозицию. Объект исследования – электрическая подстанция. Электрическая подстанция есть электроустановка, состоящая из аппаратных элементов, программных элементов, заложенных в ее работу физических процессов и вспомогательных функций. Объект разбивается на составляющие абстрактные функционально завершенные части с требуемой степенью детализации и описанием связей между частями. Каждый полученный элемент декомпозируется далее. Декомпозиция каждого объекта осуществляется до уровня необходимого и достаточного для функционирования модели объекта в рамках решаемой им задачи.

В результате декомпозиции подстанции получается множество функционально завершенных моделей элементов подстанции и описание связей элементов. Каждая модель элемента имеет четкое описание для взаимодействия с ней и ее поведение. Описание достаточное для абстрактного применения модели есть ее интерфейс. Описание поведения модели есть функциональное

назначение объекта. Реализация функционального назначения остается за рамками МЭК 61850. Это позволяет использовать функционал модели не заботясь о ее внутренней реализации. Каждая модель объекта может быть использована повторно многократно без привлечения дополнительных ресурсов.

В результате декомпозиции модель подстанции представляет собой строго иерархическую структуру. Каждый последующий уровень состоит из элементов более низкого порядка вплоть до простейших элементов. Простейшие элементы описаны системой типов и в конечном итоге представляют собой числа и имеют метаинформацию. Метаинформация простейших элементов описывает способы и условия их использования. Таким образом, простейшие типизированные элементы позволяют легко создавать сколь угодно сложные модели новых объектов. Получаемые модели новых объектов без труда интегрируются в существующие системы, расширяя их функционал. При этом не требуется никаких новых дополнительных способов взаимодействия с моделями новых объектов.

Следующая основа технологии МЭК 61850 это описание интерфейсов взаимодействия элементов модели объекта. Каждый уровень модели объекта имеет описанный интерфейс взаимодействия элементов внутри уровня и взаимодействия с элементами других уровней. Описанные МЭК 61850 интерфейсы взаимодействия элементов модели обеспечивают произвольную конфигурацию данных для обмена и метаинформацию для их интерпретации. Это позволяет иметь любое количество данных в любом элементе модели объекта. МЭК 61850 описывает механизмы передачи данных. Механизмы передачи данных определены для решения узкого круга задач информационного обмена. Заявленные механизмы покрывают все множество задач информационного обмена в модели подстанции.

Абстрагирование механизмов информационного обмена позволяет выполнять одну из поставленных перед МЭК 61850 задач – распределение элементов модели подстанции по физически разным устройствам. Это предоставляет большую гибкость при проектировании подстанции, больше возможностей по расположению устройств в ограниченном пространстве рас-

пределительных устройств и упрощению процесса ввода в эксплуатацию конечного объекта.

Типизация механизмов обмена информацией приводит к упрощению интеграции новых моделей элементов подстанции в уже существующие реализации модели.

Декомпозиция подстанции на множество меньших по сути объектов дает четко структурированную иерархическую систему. Это улучшает процесс управления и контроля за каждым элементом в отдельности и всей подстанции в целом. Декомпозиция разбивает сложность одного большого элемента на множество маленьких, что упрощает понимание функционирования отдельных элементов и взаимосвязей между ними. Примером могут служить логические узлы. Строгая иерархическая модель устройства РЗА, выраженная логическими узлами облегчает понимание функционирования устройства. Однажды описанные и реализованные модели объектов впоследствии многократно используются без процесса их перепроектирования и реализации.

Абстракция реальных объектов подстанции и физических процессов представляет их модели с необходимой и достаточной для решения задач точностью. Абстрактные модели объектов могут использоваться для проверки их полноты и правильности функционирования задолго до внедрения на действующие объекты. Процесс функционального тестирования отдельных элементов подстанции, например, функций релейных защит, упрощается, что повышает качество и уменьшает стоимость выпускаемой продукции.

Наследование широко применяется в МЭК 61850. Многие модели объектов подстанции имеют общие свойства. Наследование избавляет от реализации одного и того же функционала в каждой модели объекта. Однажды реализованный общий функционал содержится во всех моделях-потомках объектов. При этом с каждым уровнем моделирования каждая следующая базовая модель конкретизирует цель и назначение объекта-потомка.

Инкапсуляция позволяет скрыть детали реализации поведения модели объекта и избавляет МЭК 61850 от описания деталей реализации. Это дает возможность каждому производителю разрабатывать и применять свои проприетарные алгоритмы релейной защиты, например. Еще примером может служить изме-

нение реализации поведения модели объекта без влияния на работоспособность системы, в которую он интегрирован.

Интерфейсы разделяются на интерфейсы управления моделями объектов и интерфейсы информационного обмена. Строго описанные интерфейсы в МЭК 61850 позволяют без труда масштабировать любую имеющуюся систему при условии соответствия новых элементов МЭК 61850. Это хорошо заметно, например, на GOOSE сообщениях. При строгом соответствии реализации GOOSE сообщений в устройствах разных производителей замена элементов подстанции разных производителей не представляет никаких проблем. Типизированные интерфейсы позволяют подменять элементы аналогичными всего лишь перенастройкой потоков данных.

Применение ООП в основе МЭК 61850 реализует интероперабельность устройств разных производителей, взаимозаменяемость устройств разных производителей, возможность распределения одной функции в разных устройствах, масштабирование отдельных элементов подстанции и всей подстанции, упрощение интеграции отдельной подстанции в систему автоматизации региональной энергосистемы.

Для производителей оборудования для ЦПС появляется множество возможностей по упрощению процесса разработки программной и аппаратной составляющих устройств РЗА. Возможность испытаний абстрактных моделей объектов на комплексах моделирования повышает качество конечного изделия.

Интероперабельность устройств разных производителей как описано выше обеспечивается за счет общих для всех устройств описания моделей устройств и функций и интерфейсов взаимодействия отдельных элементов. При этом внутренняя реализация поведения моделей остается скрыта от потребителя и не влияет на процесс взаимодействия устройств. Устройства разных производителей без труда взаимодействуют друг с другом выполняя общую задачу. Возможно распределение одной функции на физически разные устройства.

Масштабирование как наращивание функционала отдельных элементов системы и системы в целом упрощается. Начиная с логических устройств и заканчивая подстанциями появляется возможность расширять уже имеющийся функционал эле-

ментами, которые не существовали на момент разработки существующей модели. Примером этого служит внедрение возобновляемых источников электроэнергии в существующие традиционные энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 61850, Edition 2.0, International Electrotechnical Commission, TC 57.
2. Вернон В. Предметно-ориентированное проектирование. Самое основное – пер. с англ. СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. – 160с.
3. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем – пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 448с.
4. «Цифровая подстанция» [hppt://digitalsubstation.com](http://digitalsubstation.com).

Авторы:

Галанина Наталия Андреевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». E-mail: galaninacheb@mail.ru.

Петров Сергей Викторович, аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». Закончил факультет информатики и вычислительной техники ФГБОУ «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» в 2006 году. E-mail: eight@bk.ru.

II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Морозов Д.С., Пазушкина О.В., УлГТУ, г. Ульяновск,
Россия

Аннотация. В предлагаемой статье рассмотрены некоторые возможности модернизации котельных установок для улучшения экономичности их работы. Важно, что данные усовершенствования положительно влияют на качество работы (в частности, на качество питательной воды), имеют небольшой срок окупаемости, применимы для реализации на любых предприятиях с похожим оборудованием. Разработки опробованы на реальном оборудовании и рекомендованы к применению на предприятии. Проведённые измерения подтверждают актуальность предлагаемых методов.

Ключевые слова: выпар, атмосферная деаэрация, двухступенчатая система отопления, химически очищенная вода, охладитель пара.

Вопрос повышения экономичности особенно важен при эксплуатации энергоустановок. В статье рассмотрены возможные варианты реализации этой задачи на примере котельной промышленного предприятия – пивоваренного завода АБ ИнБев Эфес в г. Ульяновске.

У завода есть паровая котельная, на которой установлено два паровых котла LOOS паропроизводительностью 23 т пара в час каждый, конденсатный бак для сбора конденсата с производства. Для приготовления питательной воды котлов используется деаэратор TDM 50. Пар от котельной идет на несколько потребителей, например на варочное производство и розлив. Для отопления корпусов котельной и завода предусмотрена установка индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), которые также потребляют пар.

Предложения по повышению экономичности котельной связаны с оптимизацией работы котельного оборудования, в частности атмосферного деаэрата. Деаэратор предназначен для удаления агрессивных газов из питательной воды перед подачей ее в котел. В качестве подпитки деаэрата используется возвращаемый с производства конденсат и химически очищенная вода (ХОВ). Также для утилизации энергии выпара деаэрата используется охладитель выпара (ОВА), выполненный в виде кожухотрубного теплообменника.

Одним из вариантов оптимизации, предложенным авторами, является использование выпара деаэрата в качестве первой ступени отопления корпуса технической службы (ТС), в котором находится котельная [1]. Как уже было отмечено, в корпусах завода используются ИТП, в частности ИТП ТС имеет тепловую мощность 200 кВт. При подпитке ХОВ исходная вода проходит через ОВА, тем самым нагревается, забирая полезное тепло от выпара. Проблема заключается в том, что подпитка ХОВ идёт в зависимости от производства непостоянно, соотношение количества ХОВ к конденсату не выше 15/85. Это значит, что выпар деаэрата большей частью уходит напрямую в атмосферу без утилизации. Предлагается установить дополнительный теплообменник на трубопроводе выпара деаэрата, который будет работать в качестве первой ступени отопительной системы, нагревая обратную ветку теплосети корпуса ТС (рис. 1). Автоматика управления ИТП в этом случае остаётся неизменной и работает по температуре обратного трубопровода – если температура будет равна заданной на щите управления или выше, то пар на ИТП потребляться не будет. В максимальных режимах экономия может составлять до 20% производительности ИТП, в средних режимах – около 9%. Срок окупаемости предлагаемого решения от 3 месяцев (при полной загрузке деаэрата и большом количестве выпара) до 2,5 лет (при малом количестве производства) с учётом сезонности [2].

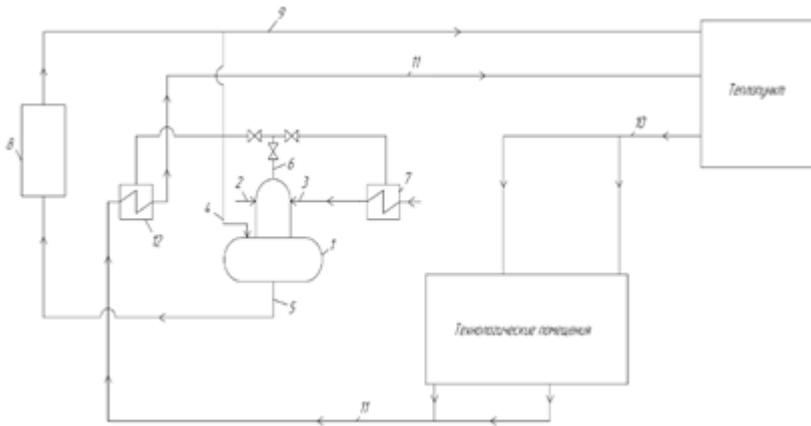


Рис. 1. Схема включения деаэрационной установки: 1 – атмосферный деаэратор; 2 – трубопровод конденсата с производства; 3 – трубопровод химически очищенной воды (ХОВ); 4 – трубопровод греющего агента; 5 – трубопровод деаэрированной воды; 6 – трубопровод выпара; 7 – охладитель выпара (ОВА); 8 – паровой котёл; 9 – паропровод; 10 – трубопровод подачи сетевой воды; 11 – трубопровод обратной сетевой воды; 12 – теплообменник

В качестве следующего способа повышения экономичности работы котельной предлагается закрытие выпара деаэратора в некоторых режимах его эксплуатации. Деаэрация направлена на снижение остаточного кислорода в питательной воде, а содержание кислорода должно контролироваться обслуживающим персоналом котельной ежемесячно. Согласно [3]: «содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора атмосферного давления не более 20 мкг/кг», а регулирование этого содержания по тому же документу происходит с помощью удельного расхода выпара на выходе из деаэратора, который должен составлять не более 2,0 кг/т деаэрированной воды. По наблюдениям за работой котельной, в расширенном порядке были взяты пробы содержания кислорода не только деаэрированной воды, но и конденсата, возвращаемого с производства. Полученные данные (содержание кислорода было на уровне 14-19 мкг/кг, редко выходя на уровень до 25 мкг/кг) позволяют предложить работу деаэрационной установки при отсут-

ствии подпитки деаэратора и при подпитке только конденсатом на закрытый клапан выпара, не ориентируясь на его удельный расход, а согласно показаниям кислородомера. Для этого на выходе с деаэратора устанавливается автоматический клапан с закрытием/открытием по потоку ХОВ. При подпитке ХОВ, где содержание кислорода очень высокое (измеряемое в мг/кг, что в сотни раз больше требуемого для питательной воды) клапан открыт и выпар уходит в атмосферу, как и до модернизации, т.к. в это время требуется удаление несконденсировавшихся агрессивных газов, удалённых из ХОВ. Когда подпитки нет или подпитка осуществляется только конденсатом с производства, то клапан на выпаре закрыт, т.к. нет поступления воды с содержащимся в ней кислородом, значит, содержание кислорода в деаэраторе увеличиваться не будет. Это позволит экономить тепловую энергию, уходящую с выпаром. В режиме, когда подпитка осуществляется с двух источников (ХОВ и конденсат) одновременно, например при сильной просадке уровня воды в деаэраторе, клапан выпара будет открыт из-за большого содержания кислорода в ХОВ. Исходя из того, что конденсат составляет большую часть подпитки, а также возможны простои на производстве, когда пар не требуется и деаэратор также простаивает, режим работы на закрытый выпар будет составлять большую (не менее 50%) часть времени, значит ценное тепло, уходящее в атмосферу с выпаром, будет экономиться.

Ещё один вопрос, который можно рассмотреть при оценке путей повышения экономичности котельной, это расход, с которым ХОВ поступает в деаэратор. Обычно подача ХОВ не нормируется и зависит от расхода питательной воды на котлы для исключения просадки уровня и поддержания его в рабочей зоне. При подпитке ХОВ проходит через ОВА, тем самым нагреваясь. Часто, нагрев бывает незначительным (до 10 °С). Для лучшего нагрева предлагается максимально занизить подачу ХОВ при подпитке при прохождении ее через ОВА. По [3] нагрев воды в деаэраторе должен быть в пределах от 10 до 50 °С, значит ОВА должен обеспечивать нагрев с 10-12 °С до минимум 54 °С. На деле при подаче ХОВ 7-9 м³/ч температура на входе в деаэратор значительно ниже. Занижая поток входящей воды, можно увеличить ее температуру. В некоторых случаях это значение дохо-

диг до 60 °С при подаче около 1-1,2 м³/ч. Но, к сожалению, такой низкий поток не обеспечивает достаточной подпитки, поэтому рассматривается вариант подачи ХОВ 3,5-4,5 м³/ч, температура после ОВА при этом повышается до 30-42 °С. В дальнейшем предлагается заменить кожухотрубный ОВА на более эффективный пластинчатый теплообменник с расчётом по заниженному потоку и требуемой температуре на выходе 80-90 °С для меньшего расхода пара на деаэрактор.

Выводы

Реализация рассмотренных мероприятий позволяют улучшить показатели экономичности термических атмосферных деаэракторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пазушкина О.В., Золин М.В., Морозов Д.С. Применение экономически эффективной технологии подогрева обратной сетевой воды в котельных установках // Сборник докладов VIII Всероссийской НТК. М.: МИСИ-МГСУ. 2020. С. 154-158.

2. Золин М.В., Морозов Д.С. Эффективное применение выпара деаэрактора для первой ступени // Сборник трудов международной научно-практической конференции. под общ. ред. И. В. Чистякова. Новороссийск, 2021 С. 96.

3. ГОСТ 16860-88 Деаэратеры термические. Типы, основные параметры, приемка, методы контроля от 04.11.88 N 3646, дата введения 1990-01-01—URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011642>. – Текст: электронный.

Авторы:

Морозов Дмитрий Сергеевич, магистрант, УлГТУ. Строительный факультет УлГТУ, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В. И. Шарапова». E-mail: goodwin731@mail.ru.

Пазушкина Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, УлГТУ. Строительный факультет УлГТУ, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В. И. Шарапова». E-mail: o.pazushkina@ulstu.ru.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НАГРЕВАТЕЛЕЙ И НЮАНСЫ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПОДОБНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Серебрянников А.В., Матвеев Н.В., Краснов Е.В., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Приведён обзор технической литературы, который показал, что передаточные функции $W_n(p)$ нагревателей различных видов (неизменяемой части системы) в основном могут быть представлены в виде: аperiodического звена 1-го порядка со звеном чистого запаздывания; колебательного звена; колебательного звена с форсирующим звеном 1-го порядка. Приведены результаты настройки ПИД-регулятора для аperiodического звена 1-го порядка с чистым запаздыванием.

Ключевые слова: передаточная функция, нагреватели, настройка ПИД-регулятора, объект регулирования.

Обзор технической литературы показал, что передаточные функции $W_n(p)$ нагревателей различных видов (неизменяемой части системы) в основном могут быть представлены в следующем виде:

1) аperiodическое звено 1-го порядка со звеном чистого запаздывания [1–4]:

$$W_n(p) = \frac{K}{Tp+1} e^{-\tau p}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления, T – постоянная времени; τ – чистое запаздывание;

2) колебательное звено [5]:

$$W_n(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент демпфирования;

3) колебательное звено с форсирующим звеном 1-го порядка [6-8]:

$$W_n(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (3)$$

Для настройки ПИД-регулятора в качестве примера возьмём апериодическое звено 1-го порядка со звеном чистого запаздывания с конкретными значениями параметров [3]

$$W_n(p) = \frac{1,96}{24,451p + 1} e^{-24p}, \quad (4)$$

где $K = 1,96$; $T = 24,451$ с; $\tau = 24$ с.

Simulink-модель для изучения процессов в замкнутой системе без регулятора и с ПИД-регулятором представлена на рис. 1.

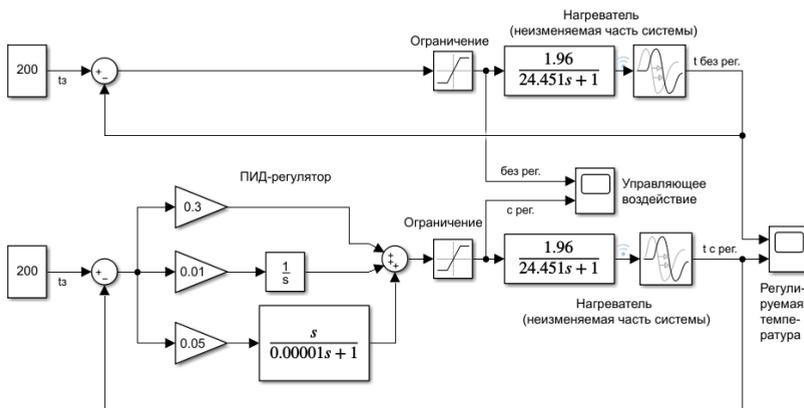


Рис. 1. Simulink-модель для изучения процессов в замкнутой системе

Сначала рассмотрим процессы в замкнутых системах без использования элементов ограничения управляющего воздействия. На рис. 2 приведены процессы изменения регулируемой температуры и управляющего воздействия при заданной температуре $t_3 = 200$ °С. Как видно из рис. 2, а, процессы без регулятора имеют большие колебательность, перерегулирование, время установления переходного процесса и статическую ошибку. От всех этих недостатков позволяет избавиться правильно настроенный ПИД-регулятор. Но на рис. 2, б видно, что в модели без регулятора управляющее воздействие (ошибка регулирования) опускается ниже нуля, что для нагревателя не имеет смысла, т.е. для этого сигнала нужно ограничение снизу на уровне 0. Кроме того, сигнал на выходе ПИД-регулятора в начальный момент времени делает резкий скачок до значения примерно 10^6 , что физически не реали-

зуюмо, т.е. этот сигнал нужно ограничить также и сверху конкретным значением, зависящим от рассматриваемого устройства.

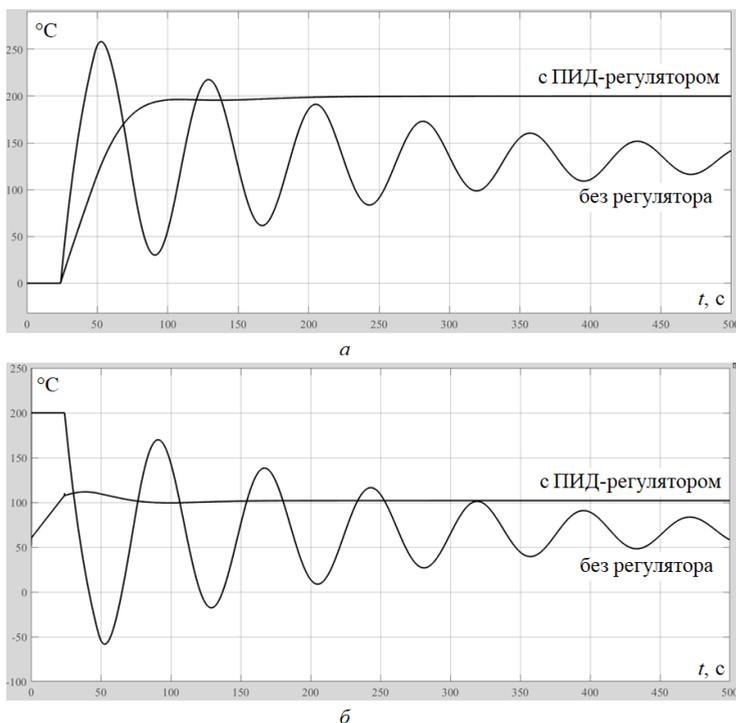


Рис. 2. Процессы изменения регулируемой температуры (а) и управляющего сигнала (б) без использования в модели блоков ограничения

Процессы изменения управляющих сигналов при использовании ограничителя (блока *Saturation*) с уровнями 0 (нижний) и 300 (верхний) представлен на рис. 3. В данном случае введение блоков ограничения не сильно влияет на процессы изменения регулируемой температуры, поэтому соответствующие графики не приводятся. Но нужно учитывать, что подобные модели с блоком ограничения будут более точными, а для некоторых устройств эта доработка модели будет сильно влиять на процесс настройки ПИД-регулятора [9], и при настройке регулятора нужно стремиться, чтобы управляющее воздействие, подаваемое на объект управления, как можно меньше подвергалось ограничению.

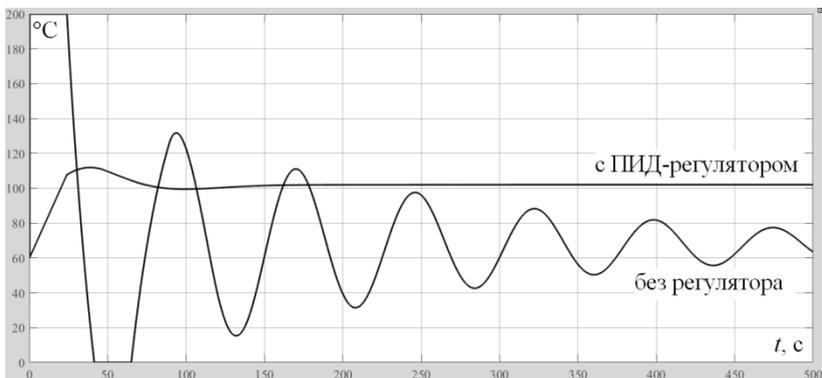


Рис. 3. Процессы изменения управляющего сигнала при использовании в модели блоков ограничения

Выводы

Как видно, при моделировании процессов во многих электронных устройствах, в т.ч. нагревательных, и особенно при использовании регуляторов, необходимо следить за значением управляющего воздействия на выходе регулятора, а лучше поставить блок ограничения перед его подачей на объект управления, т.к. не всегда удаётся избежать ограничения управляющего сигнала, особенно в самом начале переходного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов А.В. Экспериментальное определение передаточной функции объекта регулирования / А.В. Тарасов, А.А. Чепуштанов, Н.С. Горяев // Ползуновский альманах – 2011. – № 1. – С. 116-118.
2. Моделирование тепловых процессов в автоматизированных технологических системах: Методические указания к выполнению лабораторных работ / Сост. Б.П. Лебединский, В.Н. Постных. – Курган, 2013. – 26 с.
3. Тхан В.З. Экспериментальное определение передаточной функции нагревателя экструдера / В.З. Тхан, Д.Ю. Берчук // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г.: в 2 т.; Т. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 261-262.
4. Повышение точности изготовления пластиковой нити для 3D-принтеров / Д.Ю. Берчук [и др.] // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. V Всерос. науч.-практ. конф.

студ., асп. и молод, учёных (ТИМ'2016) с междунар. участием (Екатеринбург, 12–13 мая 2016 г.). – Екатеринбург: Изд-во Уральского федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – С. 160-164.

5. Экспериментальное определение передаточной функции электродного водонагревателя по его кривой разгона / А.А. Багаев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 5 (103). – С. 114-118.

6. *Чистович С.А.* Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1975. – 159 с.

7. *Багаев А.А.* Передаточная функция электродного водонагревателя по возмущающему воздействию / А.А. Багаев, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшенин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 8 (94). – С. 123-125.

8. *Багаев А.А.* Передаточная функция электродного водонагревателя по мощности / А.А. Багаев, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшенин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 11 (109). – С. 91-93.

9. *Серебрянников А.В.* Синтез ПИД-регулятора для понижающего импульсного преобразователя с аналитическим определением передаточной функции неизменяемой при синтезе части схемы и ручным подбором коэффициентов регулятора / А.В. Серебрянников, Г.В. Малинин // Силовая электроника. – 2021. – № 3 (90). – С. 36-43.

Авторы:

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 электроники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, 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.

Матвеев Николай Владиславович, аспирант кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1995 году окончил электротехнический факультет (специальность «Промышленная электроника») Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: n_matveev@yahoo.com.

Краснов Евгений Вячеславович, магистрант факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: evgeni.krasnov.99@mail.ru.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

**Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А.
Туманов Ю.А., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия**

***Аннотация.** В работе предложена использовать абсорбционный тепловой насос для снижения температуры обратной сетевой воды ТЭЦ в отопительный период для повышения эффективности ее работы. Разработана тепловая схема включения теплового насоса в составе ТЭЦ. Оценена технико-экономическая эффективность внедрения теплового насоса в тепловую схему ТЭЦ.*

***Ключевые слова:** обратная сетевая вода, абсорбционный тепловой насос, подпитка теплосети, эффективность.*

Конкурентоспособность ТЭЦ на рынке производства, передачи электрической и тепловой энергии в значительной степени зависит от экономичности ее работы. Одним из перспективных способов повышения экономичности работы ТЭЦ является снижение температуры обратной сетевой воды, которая в большинстве ТЭЦ завышена до 10-15 °С по сравнению с температурным графиком из-за недоиспользования теплоты, отпускаемой потребителям [1]. При этом тепловая мощность, расход и температура прямой сетевой воды поддерживаются на источниках теплоснабжения на необходимом уровне по заданию диспетчерской службы городов и районов, в зависимости от температуры наружного воздуха и климатических условий. Согласно правилам технической эксплуатации ТЭЦ, тепловых энергоустановок и сетей температура прямой сетевой воды поддерживается на заданном уровне по усредненной температуре наружного воздуха за период 12-24 ч с допустимым отклонением $\pm 3\%$ от температурного графика.

Температура обратной сетевой воды для ТЭЦ является неуправляемым параметром и зависит от работы всей системы теплоснабжения: источника теплоснабжения, тепловых сетей и потребителя тепловой энергии. При этом основное влияние на температуру обратной сетевой воды оказывает потребитель.

Основными причинами завышения температуры обратной сетевой воды у потребителя являются - устаревшая или загрязненная система отопления, реконструкция ограждающих конструкций зданий и сооружений с применением современных теплоизоляционных материалов и внедрение автоматического погодозависимого регулирования теплоснабжения на индивидуальных тепловых пунктах зданий и сооружений. Повышение температуры обратной сетевой воды приводит к увеличению давления пара в теплофикационном отборе и к его нерезимной работе, КПД которого влияет на работу всей паровой турбины.

Целью работы является исследование возможности использования теплового насоса для снижения температуры обратной сетевой воды Чебоксарской ТЭЦ-2, которая завышена в среднем на $5\div 6$ °С. Основным критерием при выборе теплового насоса является охлаждение обратной сетевой воды с расходом до 9500 м³/ч до расчетной температуры и последовательный подогрев исходной подпиточной сетевой воды с расходом до 800 м³/ч. Балансовыми тепловыми расчетами показано, что этим условиям в наибольшей степени удовлетворяют два параллельно включенных абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насоса BROAD BDS 2000 [2]. Согласно паспортным данным каждый из данных тепловых насосов может снизить температуру охлаждающей воды на 10 °С с расходом до 2200 т/ч и поэтому для снижения температуры обратной сетевой воды с расходом до 9500 т/ч на 5 °С необходимо использовать два тепловых насоса. Кроме того, использование теплового насоса позволяет нагревать исходную подпиточную воду теплосети полностью без использования подогревателя сетевой воды ПСВ-500-3/23 с неэкономично работающей редуционно-охладительной установкой РОУ-13/1,2.

Термодинамическими расчетами установлено, что при подключении тепловых насосов в коллектор обратной сетевой воды коэффициенты трансформации насосов составляют $\lambda = 1,9$ и они позволяют одновременно нагреть исходную подпиточную сетевую воду до 70 °С и снизить температуру обратной сетевой воды на 5 °С.

Тепловая схема включения теплового насоса в составе ТЭЦ приведена на рисунке. Из представленной схемы видно, что

тепловые насосы включены параллельно перед подогревателями обратной сетевой воды байпасной линией. Для работы теплового насоса используется пар производственного отбора турбин с температурой 250 °С, давлением 0,8 МПа и расходом 25 т/ч, что позволяет улучшить режим работы турбин типа ПТ за счет дополнительного отбора производственного пара.

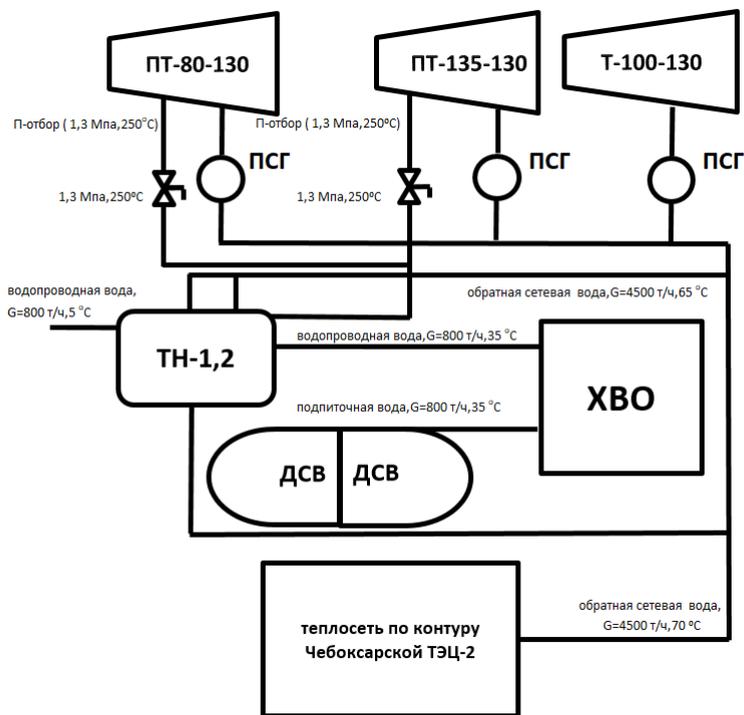


Рисунок. Тепловая схема включения теплового насоса в составе ТЭЦ-2

Режим работы внутростанционного теплофикационного оборудования после внедрения теплового насоса происходит следующим образом. Обратная сетевая вода с расходом $0,5 \cdot G_{\text{обн}}$ подается в тепловые насосы №№ 1, 2, где происходит снижение ее температуры на 10 °С, а другая часть подается через байпасную линию. Сетевая вода после тепловых насосов смешивается с основным потоком обратной сетевой воды и температура обратной сетевой воды перед подогревателями сетевой (ПСГ) во-

ды после смешения снижается на 5 °С, т.е до нормативного значения. Давление в регулируемом теплофикационном отборе при снижении температуры воды на входе в ПСГ турбины на 5 °С в среднем уменьшается на 0,05 кгс/см², что приводит к увеличению теплофикационной мощности турбины, в среднем на 1,8 МВт. [4, 5, 6]. Экономию топлива $\Delta B(P_T)$ вследствие снижения давления пара в регулируемом теплофикационном отборе до номинального значения за счет уменьшения температуры обратной сетевой воды определяется по формуле:

$$\Delta B(P_T) = b_3 \cdot \mathcal{E}_{от} \cdot \frac{\Delta \mathcal{E}_{тф}^T \cdot (\Delta q_{кн}^T - \Delta q_{тф}^T)}{q_T \cdot \mathcal{E}} \cdot 10^{-3}.$$

где b_3 – это удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии за отопительный сезон, г/кВтч; $\mathcal{E}_{от}$ – отпуск электроэнергии за отопительный сезон, тыс. кВтч; $\Delta \mathcal{E}_{тф}^T$ – недовыработка электроэнергии турбоагрегатами по теплофикационному циклу вследствие повышенного по сравнению с номинальным давление в регулируемом отборе, тыс. кВтч; \mathcal{E} – выработка электроэнергии турбоагрегатами за отопительный сезон, тыс. кВтч; $\Delta q_{кн}^T$ – относительный прирост расхода тепла брутто на выработку электроэнергии по конденсационному циклу, Гкал/МВтч; $\Delta q_{тф}^T$ – относительный прирост расхода тепла брутто на выработку электроэнергии по теплофикационному циклу, Гкал/МВтч; $q_T^{бр}$ – расход тепла брутто на выработку электроэнергии за отопительный сезон, ккал/кВтч.

Оценка экономии условного топлива при $b_3 = 250$ г/кВтч, $\mathcal{E}_{от} = 64$ млн. кВтч, $\Delta \mathcal{E}_{тф}^T = 9,4$ млн. кВтч, $\mathcal{E} = 1,2$ млрд. кВтч, $\Delta q_{тф}^T = 0,86$ ккал/кВтч, $\Delta q_{кн}^T = 2,55$ Гкал/МВтч за отопительный период составляет порядка 2800 т.у.т.

Дополнительную экономию топлива $\Delta B(POY)$ за счет подогрева подпиточной сетевой воды в тепловых насосах ТН-1,2 без использования редуционно-охладительной установкой POY-13 можно оценить по формуле

$$B(POY) = b_{т3} \cdot \tau \cdot D_{13}^{ит} \cdot (i_{13}^{ит} - i_{1,2}^T) \cdot 10^{-6},$$

где $b_{тв} = 137$ – удельный расход топлива на отпуск тепла в отопительный период, кг/Гкал; $D_{13}^{пт}$ – расход пара через РОУ, т/ч; $i_{13}^{пт}, i_{1,2}^т$ – энтальпия пара с $P=13$ и 1,2 ата.

Оценка экономии условного топлива за счет подогрева подпиточной сетевой воды за отопительный период составляет порядка 3300 т.у.т.

Таким образом, внедрение теплового насоса в тепловую схему ТЭЦ для охлаждения обратной сетевой воды до нормативного значения позволяет увеличить мощность каждой турбоустановки от 1 до 2 МВт в зависимости от мощности турбины и режима ее работы, а так же экономить до 6000 т.у.т. за отопительный период. При этом сокращаются выбросы вредных веществ с дымовыми газами, в том парникового газа- диоксида углерода до 10000 тонн.

Для дальнейшего повышения эффективности работы ТЭЦ, за счет круглогодичного использования тепловых насосов, в тепловой схеме можно предусмотреть дополнительное охлаждение циркулирующей воды в системе градирня-конденсатор для создания более глубокого вакуума в летнее время и нагрева подпиточной воды теплосети, поступающей последовательно в химцех и перед вакуумным деаэратором [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Губин В.Е., Матвеев А.С. Совершенствование схем отпуска тепла от ТЭЦ с учетом влияния внешних факторов//Известия ТПУ – 2005. – №5 – С. 148–151.
2. Афанасьев В.В. Исследование возможности применения теплового насоса для снижения температуры обратной сетевой воды ТЭЦ / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, Ю.А. Туманов // Динамика нелинейных дискретных электротехнологических и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 373–374.
3. Туманов Ю.А. Исследование возможности применения теплового насоса в составе ТЭЦ для повышения эффективности ее работы / Ю.А. Туманов, А.И. Зубов, В.В. Афанасьев // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 160–165.

4.РД 34.30.719 Типовая энергетическая характеристика турбины ПТ-135/165-130/15. М.: СПО ОРГЭС. 1985. 89 с.

5.РД 34.30.703 Типовая энергетическая характеристика турбины ПТ-80/100-130/13. М.: СПО ОРГЭС. 1985. 65 с.

6. Типовая энергетическая характеристика турбины Т-100/120-130-5. М.: СПО Союзтехэнгерго. 1984. 65 с.

7. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики электрификации о тепловой экономичности оборудования РД 34.08.552-95. М.: СПО ОРГЭС. 1995. 126 с.

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 защищена докторская диссертация «Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами». E-mail: avvteo@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, декан факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1973 окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1982 защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Исследование электрических параметров многоэлектродных электрошлаковых печей». E-mail: espp21@mail.ru.

Краснов Евгений Вячеславович магистрант факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: evgeni.krasnov.99@mail.ru.

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1972 году. В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Аналитические исследования электрических полей и выбор схем питания и электрических параметров многоэлектродных установок». E-mail: vladimir_tarasov@inbox.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 СПОСОБА ПО УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Марченко А.В., Захаров А.А., ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** Для производства холода на пищевом производстве применяется холодильные машины, от которых помимо полезного теплоносителя с низкой температурой, также присутствует и теплота, которая выбрасывается в атмосферу. Принцип действия основан на утилизации низкопотенциальной теплоты от chillера, путем установки теплообменника на конденсаторном блоке, из которого нагретый теплоноситель поступает в теплообменник различных систем. Теплота, переданная носителю используется на производственные, а также на хозяйственно-бытовые нужды для подогрева холодной воды.*

***Ключевые слова:** холодильное оборудование, энергетическая эффективность, утилизация теплоты.*

Цель исследования – разработка технических решений по использованию низкопотенциальной теплоты от холодильных установок, которую они вырабатывают как побочный продукт от производства холода. Авторами определены условия и способ, которые способствуют рациональной утилизации тепловой энергии, а также повышению эффективности энергосбережения и оптимизации технологических процессов. Научная новизна исследования заключается во внедрении нового способа утилизации бросовой теплоты на предприятиях пищевой промышленности, а именно в молочное производство, где в технологических процессах есть потребность не только в холоде, но и в большом количестве теплоты. В результате исследования разработана принципиальная схема, которая позволит снизить затраты на подогрев теплоносителя, увеличить энергетическую эффективность предприятия, а также тем самым уменьшить негативное влияние на окружающую среду, за счет снижения количества тепловых выбросов в атмосферу.

Для обеспечения предприятий холодоносителем с низкими температурами применяются холодильные машины, которые, в

свою очередь, производят много низкопотенциальной теплоты. Данная особенность холодильных машин обуславливается их принципом работы, а именно пароконденсационным циклом. Ввиду этого огромное количество тепла просто выбрасывается в атмосферу через конденсаторы данных установок.

Для применения систем утилизации тепла желательно, чтобы графики работы холодильной машины и потребности в горячей воде по возможности совпадали. Поэтому наиболее целесообразно использовать эти системы там, где холод вырабатывается постоянно. Например, на предприятиях пищевой промышленности, где горячая вода необходима для мойки помещений. При утилизации теплоты конденсации можно снять большое количество тепла, но тепла низкопотенциального, позволяющего нагреть воду или воздух лишь до 35-40 градусов. Авторами описана схема съема и дальнейшего полезного применения тепла.

В работе описана схема утилизации на примере молочного производства, где постоянно требуется большое количество холода для охлаждения сырья (молока), а также для поддержания заданных параметров температуры в помещениях складирования готовой продукции. При работе холодильной машины она отбирает теплоту у охлаждаемых тел и передает ее на конденсатор для отвода.

Для осуществления работы системы, в соответствии с разработанными принципиальными решениями, требуется установить конденсатор с водяным охлаждением на установку производства холода. Теплоноситель нагревается в теплообменнике-конденсаторе, затем поступает в бак-аккумулятор, служащий для сглаживания неравномерности потребления нагретой воды. Затем нагретая вода поступает на различного рода технологические нужды, такие как: мойка помещений и оборудования, подогрев танков производства кисломолочной продукции (рис. 1).

В том случае, если есть потребность в воде с более высокой температурой, то требуется догреть воду до требуемых параметров – это можно сделать при помощи электрических, газовых нагревателей, а также через бойлер косвенного нагрева с теплоносителем от котельной (рис. 2).

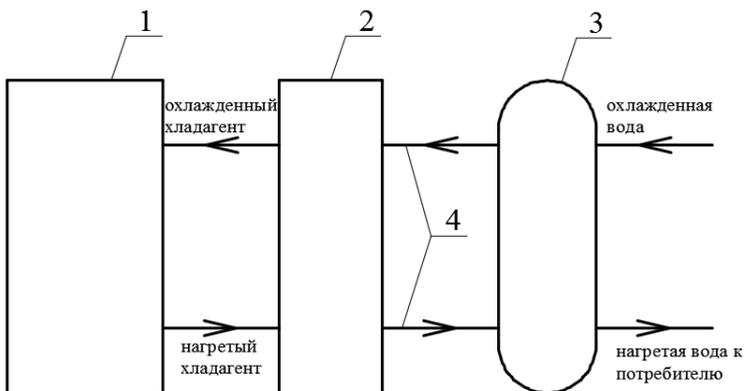


Рис. 1. Схема установки без дополнительного подогрева:
 1 – холодильная установка; 2 – теплообменник-конденсатор;
 3 – бак-аккумулятор; 4 – трубопроводы циркуляции

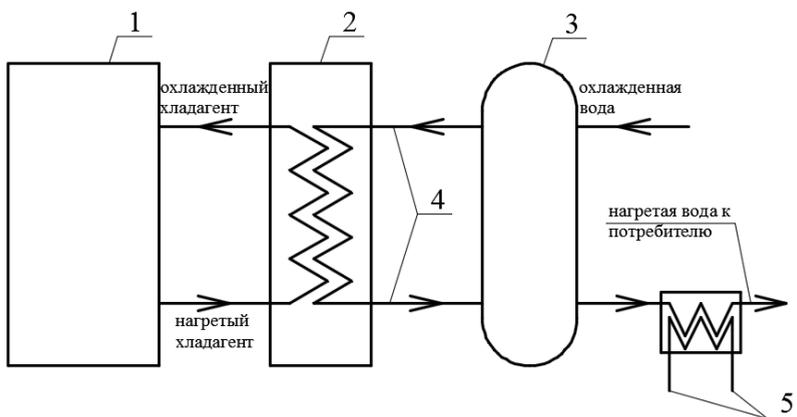


Рис. 2. Схема установки без дополнительного подогрева:
 1 – холодильная установка; 2 – теплообменник-конденсатор;
 3 – бак-аккумулятор; 4 – трубопроводы циркуляции;
 5 – подающий и обратный трубопровод от котельной

Заключение

При реализации разработанного авторами технического решения по использованию низкопотенциальной теплоты на предприятия пищевой промышленности, такие как: молочное

производство, мясоперерабатывающие комбинаты и другие, снижаются экономические затраты на производство тепловой и электрической энергии. Стоит отметить, важным достоинством можно считать простоту внедрения данной установки, а также данная она обладает высокой степенью надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Теплообменное оборудование предприятий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niztr.narod.ru/metod/kpte/17.pdf> (10.09.2021).

2. Мааке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л., Учебник по холодильной технике [Электронный ресурс] URL: <http://refportal.com/library/knigi/uchebnik-po-holodil-noy-tehnike-pol-mann/> (10.09.2021).

Авторы:

Марченко Александра Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарипова», заместитель декана строительного факультета по воспитательной и научно-исследовательской работе, внештатный эксперт по проведению судебной строительно-технической экспертизы в Союзе «Ульяновская областная торгово-промышленная палата». Защитила кандидатскую диссертацию по специальностям 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «УлГТУ». E-mail: al-marchenko@yandex.ru.

Захаров Алексей Алексеевич, магистрант кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарипова», инженер-проектировщик, ООО «НТЦ «ПромТехЭнерго». Закончил строительный факультет Ульяновского государственного технического университета в 2020 году. На данный момент магистрант кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарипова», ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». E-mail: alex73.98@mail.ru.

УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ

Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Афанасьев В.В., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В работе рассмотрены возможности уменьшения вредных выбросов при использовании твердых видов топлива. Показано, что газификация позволяет уменьшить эмиссию диоксида углерода и других вредных веществ.*

***Ключевые слова:** твердое топливо, газификация, вредные выбросы, эмиссия диоксида углерода.*

Во всем мире использование в большой и коммунальной энергетике твердых видов топлив и загрязнение окружающей среды остаются актуальными проблемами. Альтернативные источники энергии, как показал опыт США и Европы в 2021 году, не обеспечивают необходимую для систем жизнеобеспечения надежность. Для России проблема усугубляется, во-первых климатическими условиями и прохождением осенне-зимнего максимума, а во-вторых огромными территориями с низкой плотностью населения, что приводит к низкой экономической эффективности централизованной газификации.

В то же время внедрение современных технологий децентрализованной электроэнергетики [1, 2, 3] с использованием твердых топлив проблематично из-за высокой стоимости их доставки и подготовки к сжиганию, достаточно жесткой привязки энергетического оборудования к типу топлива, сложностью автоматизации и внедрения высокопроизводительных «безлюдных» технологий, использования комбинированных циклов выработки тепловой и электрической энергии в ГТУ и ПГУ. Особые трудности возникают при использовании низкосортных топлив (бурый уголь, отходы, сланцы, биомасса), которые содержат большое количество влаги и минеральных примесей, имеют низкую теплоту сгорания.

В золах уноса и шлаках при сжигании твердых топлив содержатся вредные выбрасываемые в окружающую среду соединения, являющиеся канцерогенными. Электротермические техно-

логии позволяют получить из золошлаков дорогостоящие продукты.

При сжигании любых углеродосодержащих топлив в атмосферу выбрасывается диоксид углерода, эмиссии которого в настоящее время уделяется большое внимание. Экологическая эффективность различных видов топлив определяется удельной эмиссией вредных выбросов – массой выбросов на единицу теплотворной способности. Удельная эмиссия диоксида углерода m_{CO_2} при сжигании топлив определяется содержанием углерода в топливе C_r и тепловым эффектом горения Q_r

$$m_{CO_2} = \frac{3,67C_r}{Q_r} \quad (1)$$

Горючими компонентами твердого топлива являются углерод C , водород H и сера S . При уменьшении содержания углерода в твердом топливе углекислого газа образуется меньше, чем при горении чистого углерода, однако за счет негорючих компонентов, в первую очередь кислорода O_r и влаги W , тепловой эффект горения также уменьшается.

Низшая теплота сгорания твердого и жидкого топлива может быть определена как:

$$Q_r = 338C_r + 1025H_r - 108,5(O_r - S_r) - 25W_r \quad (2)$$

Для твердого и жидкого топлива удельная эмиссия диоксида углерода

$$m_{CO_2} = \frac{3,67C_r}{338C_r + 1025H_r - 108,5(O_r - S_r) - 25W_r} \quad (3)$$

Уменьшение влажности топлива при сушке снижает удельную эмиссию диоксида углерода, что особенно важно для древесной массы.

В табл. 1 приведены характеристики сжигания различных твердых топлив. Из табл. 1 видно, что при сжигании каменных углей удельная эмиссия диоксида углерода составляет от 0,0924 кг/МДж до 0,0945 кг/МДж, бурых углей от 0,1025 кг/МДж до 0,1060 кг/МДж, торфа до 0,1116 кг/МДж, горючих сланцев до 0,321 кг/МДж, древесины от 0,112 кг/МДж до 0,163 кг/МДж.

Таблица 1

Характеристики сжигания различных твердых топлив

Топливо, марка и месторождения	Содержание углерода, %	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Масса диоксида углерода при сгорании 1 кг топлива	Удельная эмиссия диоксида углерода, кг/МДж
Каменный уголь Ж, Печорский бассейн	59,6	23650	2,1873	0,092487
Каменный уголь Д, Черемхово Иркутской области	46,2	17880	1,6955	0,094829
Каменный уголь Г, Ургал Хабаровского края	50,9	19970	1,868	0,093542
Каменный уголь Д, Печорский бассейн	45,2	17540	1,6588	0,094575
Бурый уголь БЗ, Волчанск Свердловская область	29,7	10630	1,0899	0,102539
Бурый уголь Б2, Назарово Красноярский	37,6	13020	1,37992	0,105985
Бурый уголь Б2, Ирша-бородинское месторождение	43,7	15650	1,60379	0,102479
Торф фрезерный	24,7	8120	0,90649	0,111637
Горючий сланец	67	7660	2,4589	0,321005
Сосна	50,1	11 280	1,8387	0,163003
Осина	47,8	12 685	1,7543	0,138294
Береза	49,3	15 454	1,8093	0,117077
Ольха	49	15 950	1,7983	0,112746

Газификация твердых топлив, которая может быть автотермической или аллотермической, позволяет получить из твердых топлив горючие газы, которые могут быть использованы в любых теплотехнологических установках [1-4].

Автотермическая газификация предъявляет высокие требования к химическому и гранулометрическому составу первичного сырья, характеризуется узким диапазоном устойчивых режимов, ограничением изменения производительности и смещения равновесия химических реакций за счет изменения температуры.

Аллотермическая газификация протекает при подводе тепловой энергии извне, обеспечивающей высокую температуру процесса, это дает возможность переработки любых твердых топлив, достижение любых температур, разложение всех органических компонентов (смол, диоксинов, фуранов) до оксидов углерода, водорода и водяных паров. Это позволяет вести процессы в любой среде (окислительной, восстановительной, нейтральной) при различных давлениях. При повышенном давлении происходит образование метана [3].

Из приведенных табл. 2 обобщенных характеристик различных технологий аллотермической электротермической газификации 1 кг бурого угля при атмосферном давлении [1, 2], а также автотермической газификации в шлаковом расплаве и паровоздушной автотермической газификации при повышенном давлении [3, 4] видно, что удельная эмиссия диоксида углерода снижается при увеличении содержания водорода и метана. Наиболее высокое содержание водорода достигается при паровой газификации, которая возможна только в аллотермических газификаторах. При паровоздушной автотермической газификации в синтез-газе появляется метан, что снижает эмиссию диоксида углерода. Однако при автотермической газификации до 30% топлива расходуется на поддержание температуры процесса, а снижение эмиссии диоксида даже при повышенном давлении менее существенно, чем при аллотермической газификации.

Как видно из табл. 1 и 2 при сжигании синтез-газа, полученного электротермической газификацией твердых топлив, удельная эмиссия диоксида углерода может быть ниже, чем у исходных твердых топлив. Кроме того, синтез-газ позволяет использовать конденсатные технологии и перейти на высшую теп-

лоту сгорания газа, что может повысить КПД котлов на 5-9 %. Сжигание содержащих серу твердых топлив делает практически невозможным применение конденсатных технологий.

Таблица 2

Вид процесса газификации	Характеристики процесса				
	Содержание в синтез-газе			Низшая теплота сгорания газа,	Удельная эмиссия диоксида углерода
	оксида углерода	водорода	метана		
	%	%	%	МДж/м ³	кг/МДж
Электротермическая паром	43,5	56,2	-	11,55	0,074
Электротермическая кислородом и паром	54	45,3	-	11,7	0,0907
Электротермическая кислородом	71,1	28,2	-	12,0	0,1165
В шлаковом расплаве (Ромелт)	77	14	-	11,21	0,135
Природный газ	-	-	84,5	35,48	0,0551
Паровоздушная бурого угля	30	13	2	59,00	0,1066
Паровоздушная торфа	28	15	3	6,222	0,098
Паровоздушная древесины	29	14	3	6,24	0,101

Для обеспечения требуемой технологическим процессом теплоты Q_{pol} при сжигании топлива должна выделяться теплота

$$Q_{top} = \frac{Q_{pol}}{\eta}, \quad (4)$$

где η – КПД теплотехнологической установки.

Эмиссия диоксида углерода при сжигании топлива для получения требуемой теплоты Q_{pol}

$$M_c = \frac{Q_{pol} m_{CO_2}}{\eta}. \quad (5)$$

Уменьшение эмиссии углерода при переходе от топлива 1 к топливу 2 составит

$$\Delta M_c = Q_{pol} \left(\frac{m_{co_1}}{\eta_1} - \frac{m_{co_2}}{\eta_2} \right). \quad (6)$$

Коэффициенты полезного действия котельных установок при сжигании газообразного топлива выше, чем при сжигании твердого топлива, что позволяет дополнительно уменьшить эмиссию диоксида углерода, а также массогабаритные размеры котельной установки. При комбинированной выработке электрической и тепловой энергии коэффициент использования топлива достигает 90 % .

Расчет материального баланса на 1 тонну бурого угля Канско-Ачинского Назаровского месторождения.

Рабочая масса топлива (%): $Wr = 39$; $Ar = 7,3$; $Sop + Sk = 0,4$; $Cr = 37,6$; $Hr = 2,6$; $Nr = 0,6$; $Or = 12,7$. Низшая теплота сгорания угля: $Q_r = 13,02$ МДж/кг. Состав золы (%): $SiO_2 = 30,5$; $Fe_2O_3 = 19$; $CaO = 35$; $MgO = 4$. Содержание оксидов железа в минеральной части 14 кг, из них можно восстановить 9,7 кг железа, а из 22 кг оксидов кремния можно восстановить 10 кг кремния. В электротермическом газификаторе в аллотермическом восстановительном процессе из шлака можно получить 19 кг ферросилиция.

Расчеты показывают:

– при сжигании 1 т бурого угля масса диоксида углерода составляет 1,38 т, удельная эмиссия диоксида углерода – 0,105985 кг/МДж;

– на тепловой электростанции мощностью 100 МВт с кпд 40 % при сжигании угля с расходом 68,18 т/ч, эмиссия диоксида углерода составит 95,38 т/ч, за сутки – 2289 т;

– при использовании в качестве топлива синтез-газа, полученного электротермической паровой газификацией, суточная эмиссия диоксида составит 1598 т, при парокислородной газификации – 1959 т.

Следовательно, суточная эмиссия диоксида углерода уменьшается на 330..690 т. При работе 8000 часов в год электростанция мощностью 100 МВт позволяет уменьшить эмиссию диоксида углерода на 110000... 230000 т, предотвратить выброс

в атмосферу 4300 т оксидов серы и получить 150 т ферросилиция. Угруппенная оценка показывает, что аллотермическая газификация позволяет снизить все вредные выбросы, в том числе и эмиссию диоксида углерода и позволяет кроме синтез-газа получить строительные материалы из шлака и ферросплавы.

Аллотермическая электрошлаковая технология позволяет управлять процессом, повысить температуру и проводить восстановительные процессы, при этом возможно снижение потребления электроэнергии (в часы пик энергосистемы) и восстановление части оксидов в шлаковом расплаве при повышении температуры введением электрической энергии в часы минимума. При резистивном нагреве в электродных печах, вследствие большой тепловой инерции, возможно снижение мощности в часы пик, при этом перебои в электроснабжении не приводят к нарушению процесса. Действующие крупные электродные рудовосстановительные печи допускают не только снижение мощности, но и перерыв в электроснабжении до суток.

Плазменные установки позволяют газифицировать любые топлива [5], однако они имеют низкую стойкость плазмотронов [6], перерыв в электроснабжении вызывает нарушение процесса с образованием настыли и невозможностью слива жидких продуктов.

Электротермические шлако-восстановительные технологии позволяют обеспечить практически безотходную переработку любых твердых топлив и уменьшить «углеродный след» энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.В. Электротермическая газификация твердых топлив / Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Орлов В.Н. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. 2 – № 1-2. Режим доступа к журн. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19836>.

2. Афанасьев В.В. Электротехнологические комплексы как регуляторы работы электроэнергетических систем / В.В.Афанасьев, В.Г.Ковалев, В.А.Тарасов// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019. т. 21. №5. С.50-58. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-50-58.

3.Алешина А.С., Сергеев В.В. Газификация твердого топлива: учеб. пособие.-СПб.: Изд. Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 202 с.

4.Кашин, Е. М. Балансово-концентрационный метод определения состава и выхода древесного генераторного газа. Балансовая часть / Е. М. Кашин, В. Н. Диденко //Деревообрабатывающая промышленность. 2018. – №1. – С. 73–82.

5.Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимические технологии переработки топлив // Известия вузов. Химия и химическая технология. - 2012. - Т. 55, Вып. 4. - С. 30-34.

6.Чередниченко М.В. Эрозия электродов плазмотронов при использовании различных источников питания / Чередниченко М.В., Сериков В.А., Бутаков Е.Б, Урбах А.Э. // Электрометаллургия. – 2017. – №6. – С. 2-7.

Авторы:

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, декан факультета энергетики и электротехники 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.

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1972 году. В 1980 году защищена кандидатская диссертация «Аналитические исследования электрических полей и выбор схем питания и электрических параметров многоэлектродных установок». E-mail: vladimir_tarasov@inbox.ru.

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 защищена докторская диссертация «Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами». E-mail: avvteo@mail.ru.

III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОПТИМАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Тумаева Е.В., Афлятунов И.Ф., Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Нижнекамск, Россия

Кузин С.С., ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Рассматривается автоматизированный электро-технический комплекс группы асинхронных двигателей с оптимальным распределением мощности конденсаторных установок. Комплекс применяется для радиальных схем электроснабжения группы технологических асинхронных электроприводов и позволяет снизить потери мощности в кабельных линиях 0,4 кВ. Предлагается использовать современные устройства компенсации реактивной мощности непосредственно у асинхронных двигателей. Значения реактивной мощности конденсаторных установок определяются в результате решения задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь в линиях 0,4 кВ.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, потери в кабельных линиях, компенсация реактивной мощности, автоматизированный комплекс.*

Введение

На крупных нефтехимических предприятиях в основном используются радиальные схемы электроснабжения [1-5]. Традиционным способом снижения потерь электроэнергии является установка компенсирующих устройств реактивной мощности в цеховых трансформаторных подстанциях на стороне 0,4 кВ. При

этом кабельные линии 0,4 кВ, питающие электроустановки, остаются загруженными избыточной реактивной мощностью. С учетом способа прокладки кабелей длина питающих кабелей 0,4 кВ может достигать 200 – 400 м. Основными приводными двигателями являются асинхронные двигатели, обычно работающие в режиме неполной загрузки, что приводит к уменьшению коэффициента мощности. В стремлении повысить коэффициент мощности непосредственно у асинхронных двигателей, был рассмотрен вариант установки конденсаторных батарей непосредственно у двигателей, что также приводит к снижению потерь мощности в питающих кабельных линиях. В целях получения наилучшего результата возникла идея использовать задачу оптимального распределения компенсирующих устройств в системах электроснабжения, рассмотренную в [3]. В статье предлагается использовать современные устройства компенсации реактивной мощности непосредственно у асинхронных двигателей, являющихся источниками реактивной мощности, разгружая тем самым и питающие кабельные линии 0,4 кВ. Значения реактивной мощности конденсаторных установок определяются в результате решения задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь в линиях 0,4 кВ.

Постановка и решение оптимизационной задачи

Постановка и решение оптимизационной задачи для различных технологических комплексов неоднократно рассматривались в работах [1,2,4,5]. В расчетах учитывались коэффициенты загрузки асинхронных двигателей и были рассчитаны потери в линиях 0,4 кВ от протекания реактивных токов для случая оптимального распределения компенсирующих устройств непосредственно у асинхронных двигателей $\Delta P_{Q_{\text{опт}}}$ от протекания реактивных токов без устройств компенсации реактивной мощности ΔP_Q , а также суммарные активные потери в линиях 0,4 кВ без компенсации реактивной мощности ΔP_{Σ} . Применение результатов решения задачи оптимального распределения реактивной мощности компенсирующих устройств по критерию минимума потерь в линиях позволяет значительно снизить потери от протекания реактивных токов и суммарные потери в целом.

Автоматизированный электротехнический комплекс

В настоящее время авторами разрабатывается автоматизированный электротехнический комплекс группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств и проводятся исследования снижения активных потерь при передаче электроэнергии по протяженным кабельным линиям к электроприводам производственных механизмов.

На рисунке представлена принципиальная схема разработанного комплекса для группы насосов технологической установки. Элементы автоматизированного комплекса по их назначению можно разделить на функциональные группы. Блоки измерения БИ1 – БИ5 выполняют измерительную функцию. Основная их задача – измерение значений линейных напряжений и фазного тока на каждом из потребителей, а также на шинах распределительного устройства. На основе измерений формируются выходные данные – действующие значения фазного тока и потребляемой потребителями трехфазной реактивной мощности.

Собранная блоками измерения информация по цифровой шине данных передается на следующий блок БСД – блок сбора данных, который выполняет функцию систематизации и упорядочения данных. Также наличие блока БСД позволяет легко и быстро наращивать количество электроприемников и компенсирующих устройств в электротехническом комплексе. Блок сбора данных передает систематизированные данные на блок БРМ – блок расчета требуемой мощности конденсаторных батарей. Данный блок выполняет функцию обработки данных, производя расчет величины мощности конденсаторных батарей каждого электроприемника, участвующего в комплексе. Результаты расчетов в виде управляющего задания через блок БСД передаются на УКРМ – устройства компенсации реактивной мощности, выполняющие исполнительную функцию – компенсацию реактивной мощности.

Роль блока БРМ может взять на себя персональный компьютер. При небольшом количестве электроприемников в группе функции блока сбора данных БСД и блока расчета реактивной мощности БРМ могут быть объединены в одном устройстве.

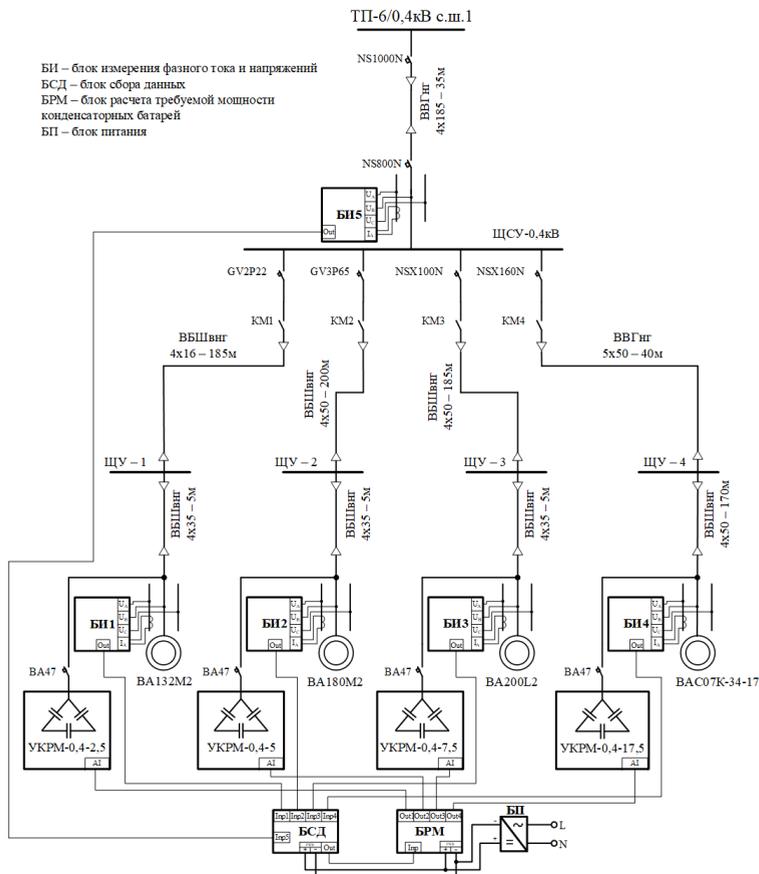


Рисунок. Принципиальная схема автоматизированного электротехнического комплекса

Более того, существует возможность реализации комплекса на основе существующей системы АСКУЭ, в которой телеметрия собирает информацию с каждого потребителя с помощью многофункциональных измерительных приборов, далее эта информация собирается на УСПД, а функции блока БРМ выполняются на автоматизированном рабочем месте (АРМ) диспетчера.

Написана программа и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661882 «Автоматизированный электротехнический комплекс группы асин-

хронных двигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств «SaveEnergy». При работе автоматизированного электротехнического комплекса группы асинхронных двигателей разработанная программа производит расчет оптимальной величины мощности конденсаторных батарей каждого асинхронного двигателя, участвующего в комплексе, в режиме реального времени с учетом фактической загрузки. Язык программирования C++.

Выводы

1. Решение задачи снижения потерь активной мощности в кабельных линиях 0,4 кВ приводит к решению задачи оптимального распределения мощности компенсирующих устройств, установленных непосредственно у асинхронных двигателей, по критерию минимума активных потерь в кабельных линиях 0,4 кВ. Предложена математическая модель задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь в линиях электропередачи от протекания реактивной мощности для радиальной схемы электроснабжения на примере схемы электроснабжения группы технологических приводов. Получено решение задачи условной оптимизации методом Лагранжа для радиальной схемы электроснабжения группы насосов технологической установки, работающих в продолжительном режиме с постоянной и плавно меняющейся нагрузкой. Установлено оптимальное распределение реактивной мощности между компенсирующими устройствами асинхронных двигателей. Разработана программа для ЭВМ, которая производит расчет оптимальной величины мощности конденсаторных батарей каждого асинхронного двигателя, участвующего в комплексе, в режиме реального времени с учетом фактической загрузки.

2. Разработан автоматизированный электротехнический комплекс группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств для группы насосов технологической установки, позволяющий исследовать снижение активных потерь при передаче электроэнергии по протяженным кабельным линиям 0,4 кВ к электроприводам производственных механизмов в установившихся и переходных режимах.

3. Дана количественная оценка снижению потерь активной мощности в линиях электропередачи при использовании конденсаторных установок, реактивная мощность которых распределена оптимальным образом для трех типовых производственных установок. Экспериментальные исследования, проведенные в программной среде MatLab, доказывают снижение активных потерь от протекания реактивной мощности в 2-4 раза, а в целом снижение потерь на 20-40 % от предложенного технического решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тумаева Е.В., Кузин С.С.* Минимизация потерь активной мощности в кабельных линиях электропередачи 0,4 кВ на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 154–160.

2. *E.V. Tumaeva, S.S. Kuzin, E.N. Gavrilov.* Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0.4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Volume 643. – Number 1. – 012100.

3. *Костин В.Н.* Оптимизационные задачи электроэнергетики. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 128 с.

4. *E.V. Tumaeva, S.S. Kuzin, I.F. Aflyatunov, T.G. Makuseva.* Solution of the problem of optimum power distribution of individual compensating devices for a group of asynchronous motors for a stable operating mode and for a smoothly changing load // E3S Web Conf. Volume 220, 2020 Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), 01015.

5. *Тумаева Е.В., Кузин С.С., Афлятунов И.Ф., Макусева Т.Г.* Решение задачи оптимального распределения мощности индивидуальных компенсирующих устройств для группы асинхронных двигателей. Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 175–192.

Авторы:

Тумаева Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой электротехники и энергообеспечения предприятий Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Окончила факультет управления и автоматизации Казанского государственного технологического уни-

верситета в 1999 году. В 2006 году получила ученую степень кандидата технических наук по итогам защиты диссертации «Синхронный электропривод с оптимальными режимами работы». E-mail: e.tumaeva@mail.ru.

Кузин Станислав Сергеевич, аспирант кафедры электропривода и электротехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Окончил факультет управления и автоматизации Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в 2019 году. E-mail: stanislav_kuzin@mail.ru.

Афлятунов Ильдар Фаатович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Окончил факультет управления и автоматизации Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВО Казанского государственного технологического университета в 2010 году. В 2016 году получил ученую степень кандидата технических наук по итогам защиты диссертации «Асинхронный электропривод с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством». E-mail: aif_69@inbox.ru.

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Плотников Ю.В., Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен пример построения аппаратной части системы резервирования мощности железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока, позволяющей повысить энергоэффективность перевозочного процесса. Приведены структурные схемы аппаратной части и блока управления системы.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, энергоэффективность, резервирование мощности, синхронное включение трансформаторов.

Введение

Применение систем автоматического резервирования мощности (СРМ) тяговых подстанций (ТП) постоянного тока, используемых в составе системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД», реализующих автоматическое подключение и отключение резервных преобразовательных агрегатов (ПА) в зависимости от поездной ситуации, позволяет снизить потери электроэнергии и повысить энергоэффективность перевозочного процесса [1]. Технический эффект достигается за счет того, что при повышении тяговой нагрузки на ТП дополнительно подключаются один или несколько резервных ПА, осуществляющих работу в параллель с основным ПА. При этом снижается выходное сопротивление ТП, что приводит к снижению доли потерь электроэнергии на ее элементах. При последующем уменьшении тяговой нагрузки ниже определенного уровня, работа нескольких агрегатов в параллель становится неэффективной ввиду высоких потерь холостого хода ПА, которые начинают превышать эффект от уменьшения выходного сопротивления подстанции. В этом случае резервные ПА отключаются, оставляя в работе только основной ПА [2].

Внедрение системы резервирования заключается в установке в схему подстанции дополнительного оборудования, анализирующего входной или выходной ток каждого ПА, выполняющего необходимые вычисления и формирующего сигналы управления штатными высоковольтными выключателями (ШВВ). При этом система может представлять собой блок управления небольших размеров, подключаемый к вторичным цепям ТП и набор датчиков. Такой подход не требует установки дополнительного дорогостоящего силового оборудования, что значительно упрощает и удешевляет процесс реализации рассматриваемого метода.

Несмотря на то, что большинство современных ТП постоянного тока содержат микропроцессорные системы управления, способные выполнять, в том числе, и функции резервирования мощности, в ОАО «РЖД» эксплуатируется большое количество старых ТП второй половины прошлого века, либо не имеющих подобных систем, либо имеющих примитивные устаревшие системы, не способные реализовать весь потенциал описывае-

мого метода. Поэтому создание аппаратной части современной системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока является актуальной технической задачей.

Решение задачи

В Омском государственном университете путей сообщения была разработана аппаратная часть СРМ для ТП с двумя ПА, структурная схема которой представлена на рис. 1.

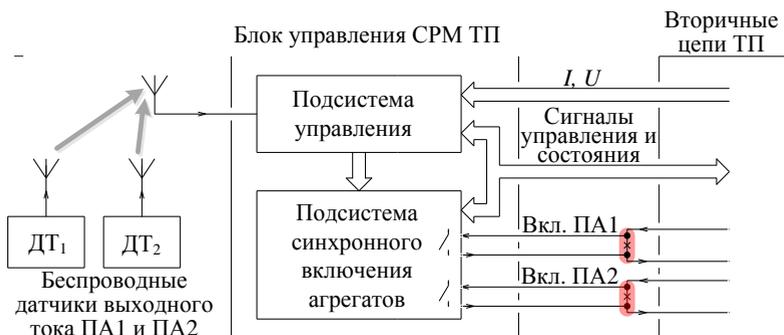


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части СРМ ТП

Блок управления СРМ ТП содержит в своем составе подсистему управления (ПУ) и подсистему синхронного включения агрегатов (ПСВА), необходимую для снижения просадок напряжения по шинам 10 (6) кВ в моменты включения преобразовательных трансформаторов (ПТ), возникающих из-за бросков токов намагничивания их первичных обмоток. На основе сигналов управления и состояния вторичных цепей ТП, а так же перехватывая непосредственные сигналы управления соленоидами включения ШВВ, ПСВА обеспечивает их коммутацию в требуемый момент времени относительно периода питающего напряжения, тем самым снижая просадки напряжения по шинам 10 (6) кВ до допустимого уровня [3].

ПУ измеряет входные напряжения и токи ПА, анализирует сигналы управления и состояния ТП и формирует управляющие воздействия на основе заложенного алгоритма. Сигналами входного напряжения ПА являются выходные напряжения штатных трансформаторов напряжения 10 (6) кВ, а сигналами

ПСВА обеспечивает синхронное включение каждого из двух преобразовательных агрегатов, состоит из двух отдельных устройств синхронного включения УСВ1 и УСВ2, имеющих одинаковую конструкцию [4], и соединяется с цепями подстанции посредством набора клемм 5-1...9-1, 5-2...9-2 и 10 соответственно. Питание устройств обеспечивается от сети постоянного напряжения оперативного управления ТП значением 110 В через автоматический выключатель ВК2.

На наборы клемм 3-1, 4-1, 3-2, 4-2 поступают сигналы, пропорциональные значениям входных токов преобразовательных трансформаторов, которые обрабатываются датчиками тока ДТ1–ДТ4 и далее поступают на входы модуля аналогового ввода МАВ, обеспечивающего их измерение и передачу в программируемый контроллер ПК. В случае невозможности подключения к вторичным цепям трансформаторов тока, используются беспроводные датчики выходного тока преобразовательных агрегатов, установленных на их выходах, и передающие радиосигнал, принимаемый блоком радиоканала РК. В качестве ПК использован стандартный программируемый логический контроллер «ОВЕН ПЛК-73». Для измерения токов трех фаз используется по два датчика ДТ, при этом токи двух фаз измеряются непосредственно, а третий вычисляется на основе известных двух. Кроме сигналов тока, МАВ производит измерение входного напряжения преобразовательного трансформатора, поступающего на набор клемм 10, информация о котором так же поступает в ПК. Модуль цифрового ввода-вывода МЦВВ обеспечивает анализ состояния блок-контактов высоковольтных выключателей, поступающих на клеммы 8-1, 9-1, 8-2, 9-2 блока управления, передавая полученную информацию в ПК. Кроме того, на основе сигналов, полученных от ПК, МЦВВ формирует управляющие сигналы о включении и выключении преобразовательных агрегатов, которые поступают в цепи оперативного управления подстанции через наборы клемм 1-1, 2-1, 1-2, 2-2. Текущий режим работы системы резервирования задается переключателем ПР, имеющим три состояния: «ПВ1 основной», «Откл.», «ПВ2 основной». Согласно названию состояний, этот переключатель позволяет определять, который из ПА будет выполнять функции основного агрегата. В процессе работы, для

равномерного износа высоковольтных выключателей, персоналу необходимо производить изменение режимов работы не реже одного раза в месяц. Выходной сигнал ПР поступает напрямую в ПК. В качестве регистратора, фиксирующего информацию о текущем состоянии системы резервирования, включая электрические параметры – токи и напряжения, с частотой не реже одного раза в секунду, использован стандартный модуль сбора данных МСД «ОВЕН МСД-200», подключенный к ПК посредством протокола передачи данных Modbus. Питание ПК обеспечивается от сети собственных нужд тяговой подстанции через автоматический выключатель ВК1. Эта же сеть питает блок питания БП, формирующий постоянное напряжение значением 24 В, питающее все остальные модули ПУ за исключением ДТ1–ДТ4.

Гальваническая развязка всех входных и выходных сигналов обеспечивается внутри модулей УСВ1, УСВ2, МЦВВ, ДТ1–ДТ4 посредством использования оптотранзисторных сборок, трансформаторов, электромагнитных реле и условно изображена на рисунке линией желтого цвета. Для приема сигналов с датчиков выходного тока ПА в состав ПУ введен модуль радиосвязи РК, подключенный к ПК посредством протокола передачи данных Modbus.

Полученные результаты и выводы

В 2019 году Омским государственным университетом путей сообщения были выполнены работы по внедрению шести интеллектуальных систем резервирования мощности ТП постоянного тока на действующем участке Петрушенко – Называевская Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги, построенных на основе описанной аппаратной части [5]. Дальнейшая эксплуатация подстанций подтвердила работоспособность разработанных технических и технологических решений. Общее расчетное снижение потерь электроэнергии на шести подстанциях участка за 2020 г. составило 570,8 тыс. кВт·ч в год, что эквивалентно снижению потерь электроэнергии на 0,45 %. Все это позволяет рекомендовать представленную концепцию аппаратной части для построения систем резервирования мощности железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каштанов А.Л.* Методы выбора уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А.Л. Каштанов, А.Д. Дмитриев // Известия Транссиба. – 2020. – № 1(41). – С. 50-58.

2. *Каштанов А.Л.* Моделирование режимов работы интеллектуальной системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А.Л. Каштанов, М.М. Никифоров, Ю.В. Плотников // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 5. – С. 22-26.

3. *Тарута П.В.* Экспериментальная оценка величины провала напряжения при подключении резервного выпрямительного агрегата / П.В. Тарута, М.А. Карабанов // Известия Транссиба. – 2010. – № 2(2). – С. 76-80.

4. Патент на полезную модель № 108233 U1 Российская Федерация, МПК H02H 9/02. Устройство для снижения бросков тока при включении трансформатора: № 2011108012/07: заявл. 02.03.2011: опубл. 10.09.2011 / В.Н. Кващук, Н.М. Лапенко, М.А. Карабанов; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги».

5. *Каштанов А.Л.* Интеллектуальная система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А.Л. Каштанов, М.М. Никифоров, Ю.В. Плотников // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 07 февраля 2020 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 370-375.

Авторы:

Плотников Юрий Викторович, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения. Окончил факультет «Автоматика и телемеханика промышленных предприятий» Омской государственной академии путей сообщения в 1997 году. E-mail: ra9mjr@mail.ru.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Синица М.К. г. Самара, Россия

Михайлов С.А., Хренников А.Ю., г. Москва, Россия

***Аннотация.** В данной статье приведены основные положения информационно-измерительной системы оценки технического состояния силовых трансформаторов. Данная система позволяет в режиме реального времени без отключения обмоток трансформатора осуществлять их защиту, а при возникновении повреждений осуществлять точные измерения с погрешностью 0,1%. Это повышает надежность и бесперебойность снабжения электроэнергией потребителей электрической энергии.*

***Ключевые слова:** информационно-измерительная система, силовой трансформатор*

Информационно-измерительная система (ИИС) для контроля параметров силовых трансформаторов, созданная на базе метода оценки состояния обмоток силовых трансформаторов по величине параметра сопротивления КЗ (или индуктивности L), используется для оперативного контроля за состоянием силовых трансформаторов в процессе эксплуатации без отключения от сети. ИИС работает с быстродействующими защитами (БЗ) от режимов, возникающих в результате появления остаточных деформаций и повреждений в обмотках силовых трансформаторов вследствие КЗ, на основе изменения параметров обмоток от электродинамических усилий в них [1, 2, 3].

Цель работы ИИС – обеспечение непрерывного контроля обмоток силового трансформатора в процессе эксплуатации без отключения от сети и включение защиты в случае начала возникновения деформаций обмоток трансформатора или их повреждения, повышение точности измерения индуктивности обмоток трансформатора.

Техническим результатом, который достигается при использовании ИИС, является предотвращение аварийных выходов из строя трансформаторно-реакторного оборудования (ТРЭО) и сокращение масштабов возможных повреждений.

Алгоритм работы ИИС следующий. Непрерывный контроль состояния обмоток контролируемого силового трансформатора обеспечивается постоянным определением значения отклонения индуктивности от базового значения индуктивности, которое берется из блока уставки индуктивности.

Во время работы трехфазного контролируемого силового трансформатора (Т) на трехфазную активную нагрузку (Н) производится измерение значения первичного напряжения U_1 с помощью измерительных преобразователей первичного напряжения (высоковольтных трансформаторов напряжения ТН1). Сигнал с преобразователей поступает на вход блока приведения первичного напряжения ко вторичному. В этом блоке вычисляется приведенное ко вторичному значение первичного напряжения:

$$\dot{U}_1 = \frac{U_1}{K_T} \quad (1)$$

где K_T – известное заданное значение коэффициента трансформации силового трансформатора.

На вход поступают сигналы с измерительных преобразователей вторичного напряжения (трансформаторов напряжения ТН2) и сигналы с выхода предыдущего блока. В блоке вычисления разности напряжений, приведенных ко вторичной стороне, определяется:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - U_2 \quad (2)$$

где U_2 – значение вторичного напряжения, измененное преобразователями ТН2.

В блоке вычисления среднего мгновенное значения напряжения вычисление производится на заданном интервале времени:

$$\dot{u}_{\text{ср}} = \frac{\dot{u} j(t_2) + \dot{u} j(t_1)}{2} \quad (3)$$

где uj – значения разности приведенных напряжений на трансформаторе; t_1 и t_2 – временные границы интервала разбиения.

В блоке вычисления производной тока вычисляется приращение по току на заданном интервале времени:

$$dij/dt = \frac{ij(t_2) + ij(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

где ij – значение тока во вторичной обмотке контролируемого трансформатора, измеренное цифровыми преобразователями тока (цифровые трансформаторы тока ТТ).

Погрешности ТТ и АЦП обусловлены:

- интегральной нелинейностью;
- погрешностью квантования и шумами;
- смещением нуля;
- погрешностью полной шкалы;
- нестабильностью коэффициента усиления программируемого усилителя.

Вычисляется падение напряжения на активном сопротивлении трансформатора как произведение

$$ij \cdot R,$$

где ij – значение тока во вторичной обмотке контролируемого трансформатора, R – значение уставки активного сопротивления трансформатора которое берется из блока уставки R и определяется расчетами и по результатам предварительного эксперимента. В блоке вычисления индуктивности определяется мгновенное значение индуктивности на заданном интервале времени:

$$L_{j_{изм.}} = \frac{\dot{u}_{cp.} - i_j \times R}{di_j / dt} \quad (5)$$

В блоке приведения значения индуктивности к номинальной частоте вычисляется мгновенное значение индуктивности, приведенное к номинальной частоте:

$$Lj = Lj_{изм} \frac{f_{изм}}{f_{ном}} \quad (6)$$

где $f_{изм}$ – измеренное преобразователем частоты значение частоты (Гц), $f_{ном}$ – номинальное значение частоты ($f_{ном} = 50$ Гц).

В следующем блоке вычисляется среднее значение индуктивности за каждый период:

$$L_{\text{ср.}} = \sum_{j=1}^N L_j / N \quad (7)$$

где N – число интервалов разбиения.

В блоке вычисления отклонения производится сравнение значения $L_{\text{ср.}}$ за период со значением уставки L_{0j} и вычисляется их отличие:

$$\Delta L = \frac{(L_{\text{ср.}} - L_{0j}) \cdot 100\%}{L_{0j}} \quad (8)$$

где $L_{\text{ср.}}$ – среднее значение индуктивности за период; L_{0j} – значение уставки индуктивности трансформатора, определяемое расчетами и по результатам предварительного эксперимента.

При возникновении начальных деформаций в ТРЭО, а также в случае внутреннего виткового замыкания в обмотках происходит развивающееся увеличение, либо уменьшение значения индуктивности L от периода к периоду, что сопровождается необратимое разрушение обмоток контролируемого силового трансформатора или реактора. При этом с блока контроля поступает сигнал на блок управления, где формируется сигнал на отключение защитного выключателя (В). ИИС и связанная с ней БЗ останавливает процесс разрушения обмоток трансформатора (рис. 1) [1, 2, 7-12].

Важным вопросом при работе ИИС является точность измерения основного диагностического параметра, характеризующего нормальную работу силового трансформатора – сопротивление КЗ или индуктивность его обмоток. Большая погрешность при измерении этого параметра может привести к сбоям в работе данного устройства: ложным отключениям или, наоборот, загроблению защит и несрабатыванию их при изменении индуктивности при повреждении трансформатора или реактора.

Блок математической обработки результатов измерений ΔL .

В блоке математической обработки результатов измерений ΔL может производиться по определенному алгоритму определение величины доверительного интервала случайной погрешности измерений индуктивности трансформатора.

ИИС позволяет непрерывно контролировать состояние обмоток силовых трансформаторов без отключения их от сети, осуществлять их защиту в случае возникновения деформаций обмоток или их повреждения и обеспечивает высокую точность измерения индуктивности при величине доверительного интервала случайной погрешности менее $+0,1\%$. Это повышает надежность работы и бесперебойность электроснабжения потребителей электрической энергии.

Выводы

1. ИИС использует быстродействующую защиту (БЗ) от режимов, возникающих в результате появления остаточных деформаций и повреждений в обмотках силовых трансформаторов и реакторов вследствие КЗ, на основе изменения параметров обмоток от электродинамических усилий в них.

2. Использование ИИС и БЗ позволяет в случае прохождения через трансформатор предельного для его обмотки сквозного тока КЗ подать команду на отключение защитного выключателя до получения трансформатором значительных повреждений обмоток, исключить возникновение аварийных и ненормированных режимов (НАР), пожаров вследствие выбросов и воспламенения трансформаторного масла и, соответственно, уменьшить размеры вероятного ущерба и затраты на восстановительный ремонт.

3. Защитный выключатель и весь комплекс защит силового трансформатора, на котором установлена ИИС, должны обладать достаточным быстродействием (не более $0,5$ периода, т.е. $0,01$ секунды) для своевременного отключения трансформатора в случае возникновения аварийных и ненормированных режимов (НАР).

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2136099. Устройство контроля и защиты обмоток трансформаторов от деформации при коротких замыканиях / Хренников А.Ю., 1999, Бюл. N24, 10 с., ил.

2. Патент РФ № 2063050. Устройство контроля и защиты трансформаторов от деформации обмоток при коротких замыканиях в процессе эксплуатации/ Лурье А.И., Шлегель А.И., Хренников А.Ю., 1996, Бюл. N18, 5 с., ил.

3. Конов Ю.С., Цурпал С.В. А.С. СССР № 1221620, кл. G 01 R 31/02. Способ контроля внутренних обмоток силовых трансформаторов. 1986 г., Бюл. № 2.

4. Конов Ю.С. А.С. СССР № 1377778, кл. G 01 R 31/02. Устройство для контроля обмоток трансформаторов на наличие механических деформаций. 1988 г., Бюл. № 8.

5. Конов Ю.С., Котиков В.В., Малышев А.В. А.С. СССР № 1644050, кл. G 01 R 31/02. Способ контроля деформаций обмоток силовых трансформаторов. 1991 г., Бюл. № 15.

6. Хренников А.Ю. Информационно-измерительные системы контроля и защиты обмоток силовых трансформаторов и реакторов// Научный вестник НГТУ, Новосибирск, 2006, № 1(22), ISSN1814-1196.

7. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 186 с.

Авторы:

Синица Марк Константинович, аспирант ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», специалист I категории отдела краткосрочного планирования Службы краткосрочного и оперативного планирования режимов филиала АО «СО ЕЭС» «Объединенное диспетчерское управление энергосистемы Средней Волги». E-mail: sinitsamk@hotmail.com.

Михайлов Сергей Александрович, студент 3-го курса НИУ МЭИ, институт – ИВТИ. E-mail: serzh_m@inbox.ru.

Хренников Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС – начальник отдела НТС и НТИ, АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети. Закончил 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОНТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Архипов А.В., Еремеев Н.А., ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия

Екандтеев А.И., АО «ЭЛАРА», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены причины возникновения несоответствия заданного значения угла поворота рабочего органа электропривода с действительным и предлагаются варианты его модернизации. Результаты статьи подкреплены имитационным моделированием.

Ключевые слова: система управления, модель двигателя постоянного тока, имитационное моделирование.

Приводы являются исполнительными устройствами, осуществляющими управление угловыми скоростями и угловыми перемещениями механических объектов различного технологического назначения. Рассмотрим реализацию следящего электропривода на основе двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением.

Для построения математической модели ДПТ и редуктора рассмотрим уравнения двигателя:

$$\begin{aligned}L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} R_{\text{я}} + i C_e \omega &= U, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= i C_M i_{\text{я}} - b\omega - M_{\text{y}} - M_{\text{ш}}, \\ M_{\text{y}} &= K_{\text{y}} \cdot \varphi, \quad M_{\text{ш}} = K_{\text{ш}} \cdot \varphi.\end{aligned}\tag{1}$$

В выражении (1): $L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи, $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, U – напряжение на управляющей обмотке исполнительного двигателя, $i_{\text{я}}$ – ток, проходящий через обмотку якоря, ω – угловая скорость вала двигателя, C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью вращения двигателя и обратной электродвижущей силой (ЭДС), i – передаточное число редуктора, $U_{\text{я}}$ – напряжение на обмотках якоря, C_M – коэффициент пропорциональности между током якоря и вращающим моментом, b – коэффициент вязкого трения в оп-

рах вала, J – суммарный момент инерции, приведенный к оси органа управления, M_y – упругий момент, обусловленный торсионным способом подвеса органа управления, M_{III} – шарнирный момент, K_y – коэффициент пропорциональности упругого момента, K_{III} – коэффициент пропорциональности шарнирного момента.

С учетом математической модели двигателя структурная схема электропривода будет иметь вид, представленный на рис. 1.

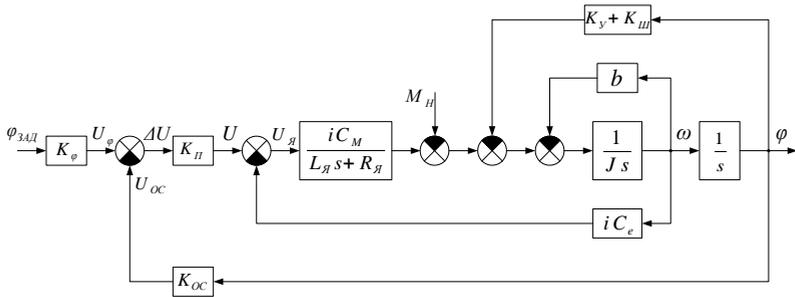


Рис. 1. Структурная схема электропривода

В соответствии с рис. 1 математическую модель (1) необходимо дополнить следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_\phi &= K_\phi \cdot \varphi_{3АД}, & U_{OC} &= K_{OC} \cdot \varphi, \\ \Delta U &= U_\phi - U_{OC}, & U &= K_\Pi \cdot \Delta U. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении (2): $\varphi_{3АД}$ – заданное угловое отклонение рабочего органа, K_ϕ – коэффициент передачи заданного углового отклонения, U_ϕ – управляющее напряжение, φ – фактическое угловое отклонение рабочего органа, K_{OC} – коэффициент передачи обратной связи, U_{OC} – напряжение с выхода устройства обратной связи, ΔU – напряжение сигнала ошибки, K_Π – коэффициент передачи прямой цепи.

В соответствии с рис. 1 полная передаточная функция привода будет иметь вид:

$$W_{ПР}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad Y(s) = K_\phi K_\Pi i C_M, \quad (3)$$

$$X(s) = JL_{\text{Я}}s^3 + (JR_{\text{Я}} + bL_{\text{Я}})s^2 + (bR_{\text{Я}} + L_{\text{Я}}[K_{\text{V}} + K_{\text{Ш}}] + i^2C_{\text{M}}C_e)s + K_{\text{OC}}K_{\text{П}}iC_{\text{M}} + R_{\text{Я}}(K_{\text{V}} + K_{\text{Ш}}).$$

Коэффициент обратной K_{OC} связи определяется по правилам теории автоматического управления (ТАУ) следующим образом:

$$K_{\text{OC}} = \frac{K_{\varphi}K_{\text{П}}iC_{\text{M}} - R_{\text{Я}}(K_{\text{V}} + K_{\text{Ш}})}{K_{\text{П}}iC_{\text{M}}} \approx K_{\varphi}. \quad (4)$$

В таком случае, установившаяся ошибка регулирования будет стремиться к нулю.

Значения коэффициентов, упомянутых в передаточной функции (3), будут иметь вид, представленный в таблице.

Таблица

Значения коэффициентов математической модели привода

№	Коэфф.	Значение	№	Коэфф.	Значение
1	K_{φ}	1	7	K_{OC}	—
2	$K_{\text{П}}$	500	8	$L_{\text{Я}}$	0.008
3	$R_{\text{Я}}$	0.531	9	C_e	3.9
4	i	6.045	10	C_{M}	3.9
5	b	0.08	11	J	0.125
6	K_{V}	0.013	12	$K_{\text{Ш}}$	0.015

Необходимо отметить, что ошибка определения заданного значения угла поворота рабочего органа электропривода может быть обусловлена влиянием момента внешней нагрузки M_{H} или недостаточно точной настройкой коэффициента ОС, как это показано на рис. 2.

В соответствии с рис. 2 увеличение коэффициента ОС на 10 % приводит к ошибке определения угла поворота на 9,1 % от абсолютного значения, а воздействие момента внешней нагрузки $M_{\text{H}} = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ приводит к ошибке определения угла поворота на 5,41 %.

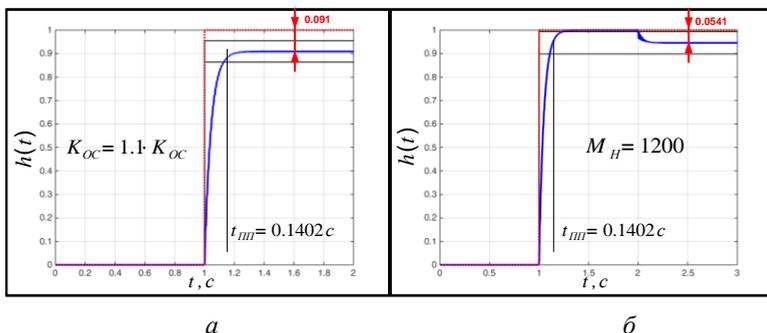


Рис. 2. Графики ошибок установившегося значения переходного процесса электропривода по причине: *а* – ошибочного значения коэффициента K_{OC} , *б* – влияния момента внешней нагрузки M_H

Согласно теории систем автоматического управления (САУ) статическую ошибку, возникающую по причине ошибочного определения коэффициента ОС, можно нивелировать на этапе конструирования более точной регулировкой усилителя ОС, либо на этапе эксплуатации с помощью добавления регулируемого коэффициента усиления на выходе системы.

Компенсационный коэффициент усиления $K_{КОМП}$ на выходе системы определяется экспериментально и будет иметь значение:

$$K_{КОМП} = \frac{K_{OC} + \Delta K_{OC}}{K_{OC}}, \quad (5)$$

где ΔK_{OC} – ошибка определения коэффициента передачи ОС.

Влияние момента внешней нагрузки M_H , в свою очередь, компенсируется ПИД или ПИ регуляторами. Структурная схема электропривода в таком случае примет вид, представленный на рис. 3.

После расчета коэффициентов ПИД регулятора методом Циглера-Никольса [2] переходный процесс привода примет вид, представленный на рис. 4.

В соответствии с рис. 4 включение в систему ПИД регулятора нивелирует статическую ошибку, но при этом увеличивает время переходного процесса с $t_{III} = 0,1402$ секунд до $t_{III} = 0,1631$ секунд и перерегулирование с $\sigma = 0\%$ до $\sigma = 20\%$.

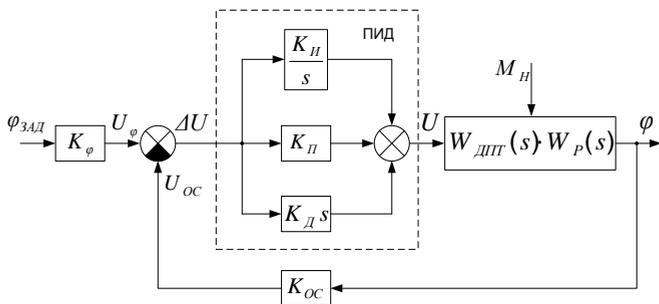


Рис. 3. Структурная схема электропривода с ПИД регулятором

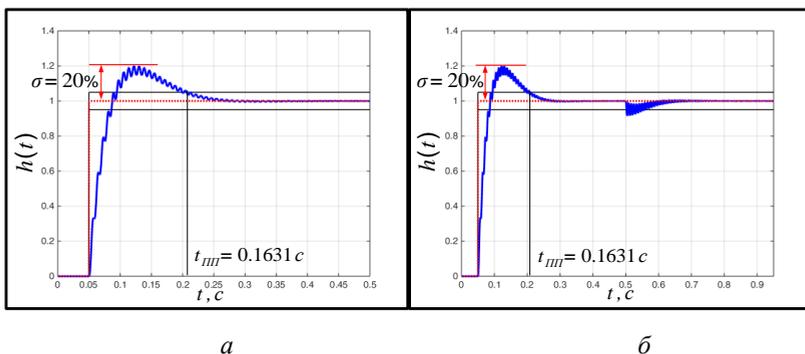


Рис. 4. Переходный процесс привода с типовыми значениями коэффициентов ПИД регулятора: *a* – при $M_H = 0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, *б* – при $M_H = 3000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ в момент времени $t = 0.5 \text{ с}$

Рассмотрим влияние введения в систему ПИД регулятора на ее устойчивость. На рис. 5 представлены амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) разомкнутых систем до введения ПИД регулятора и после. В соответствии с рисунком введение в систему ПИД регулятора уменьшило устойчивость по амплитуде с 9,99 дБ до 3,08 дБ, а устойчивость по фазе - с 89,9 градусов до 70,8 градусов.

Таким образом, для нивелирования ошибок отклонения углов вала привода, вызванных неточным определением коэффициента ОС $K_{ос}$ системы, а так же влиянием внешнего момента нагрузки M_H на вал привода, необходимо ввести в систему

ПИД регулятор и на выходе системы необходимо добавить усилитель с настраиваемым коэффициентом усиления.

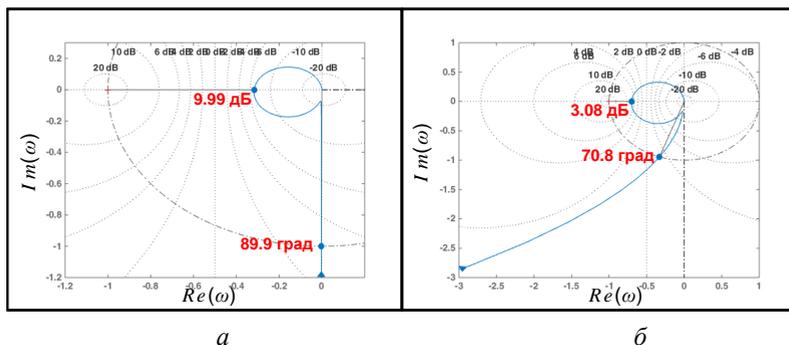


Рис. 5. Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы: *а* – при использовании П регулятора, *б* – при использовании ПИД регулятора

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.
2. Еремеев Н.А., Архипов А.В. Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем с помощью микроконтроллера // Материалы VI научно-практической конференции памяти О.В. Успенского / Сборник докладов, 2019 г., М: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, с. 210–214.

Авторы:

Архипов Алексей Владимирович, аспирант, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил факультет радиотехники и электроники, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» в 2007 г. E-mail: sgfan@mail.ru.

Екантиев Андрей Игоревич, закончил факультет систем управления, информатики и электроэнергетики ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в 2017 г. E-mail: andrey.yekantuev@gmail.com.

Еремеев Николай Алексеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил факультет радиоэлектроники и автоматики, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» в 2018 г. E-mail: nikoremeev@mail.ru.

КОНТРОЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ИТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Малафеев С.И., ООО Компания «Объединенная Энергия»,
г. Москва, Россия

Малафеева А.А., Владимирский государственный универ-
ситет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия

***Аннотация.** Представлен анализ способа и устройства кон-
троля сопротивления изоляции в системе электропитания с изолиро-
ванной нейтралью для горной промышленности. Выполнен анализ
нормативных документов, регламентирующих правила контроля со-
противления изоляции. Рассмотрены особенности непрерывного
измерения сопротивления изоляции в сетях двойного рода тока. При-
ведено описание нового технического решения, обеспечивающего по-
вышение эффективности контроля сопротивления изоляции электро-
оборудования горных машин.*

***Ключевые слова:** электрооборудование, электрическая сеть,
изолированная нейтраль, изоляция, контроль, электробезопасность.*

Введение

В добывающей и других отраслях промышленности широко используются системы распределения электроэнергии с изолированной нейтралью. Электроустановка в сети с изолированной нейтралью остается безопасной для персонала и оборудования при первом нарушении изоляции одной фазы. Однако в этом случае сеть считается аварийной, и неисправность следует устранить в кратчайшее время. Для этого требуется постоянный контроль сопротивления изоляции, включая прогнозирование и анализ причин нарушения [1-5].

Практически все способы контроля сопротивления изоляции в сетях с изолированной нейтралью основаны на создании в электрической цепи замкнутого контура с большим сопротивлением для протекания тока утечки при нарушении изоляции [1, 6, 7]. Ток утечки в контуре регистрируется и обрабатывается измерительной системой. Контур может быть пассивным, т.е. без дополнительных источников питания, или активным с использованием специальных генераторов напряжения или тока.

Для сетей постоянного, переменного и двойного рода тока в настоящее время разработано и используется большое количество разных приборов [8]. При этом большинство из них не отвечает требованиям ГОСТ 31612-2012 для условий добывающей промышленности по быстродействию и условиям эксплуатации. Поэтому актуальными вопросами являются выбор устройств и разработка новых технических решений.

В настоящей статье рассмотрены особенности контроля сопротивления изоляции в сетях с изолированной нейтралью, ориентированные на использование в горной промышленности, и разработки, выполненные в Компании «Объединенная Энергия», г. Москва.

Требования к устройствам контроля сопротивления изоляции электрооборудования в горной промышленности

В соответствии с документом РД 05-334-99 «Нормы безопасности на электроустановки угольных разрезов и требования по их безопасной эксплуатации», утвержденным Постановлением Госгортехнадзора России от 24 декабря 1999 г., № 96, в сетях с отключением без выдержки времени собственное время срабатывания защиты от токов утечки при сопротивлении однофазной утечки 1 кОм в сетях переменного тока должно быть не более 0,1 с при напряжении до 660 В и не более 0,07 с при напряжении 1140 В.

Согласно ГОСТу 31612-2012 устройства контроля сопротивления изоляции должны иметь измерительный ток не более 10 мА, срабатывать при токе однофазной утечки не более 25 мА с учётом измерительного тока и наибольших ёмкости и напряжения сети и иметь напряжение источника измерительного тока не более напряжения контролируемой сети (предпочтительное значение измерительного напряжения 100В).

Для электрических сетей двойного рода тока используются устройства, основанные на использовании генератора тестового напряжения в виде периодической последовательности импульсов специальной формы [9]. Время измерения тока утечки обычно принимается равным периоду питающей сети, т.е. 20 мс, с целью обеспечения помехоустойчивого измерения. Время заряда ёмкости питающей сети зависит от величины этой ёмкости

и активного сопротивления цепи заряда. Для обеспечения корректного измерения длительность этапа заряда выбирается из условия максимально возможной ёмкости контролируемой сети. Это служит причиной увеличения общей продолжительности измерения, которая обычно превышает 3...4 периода напряжения контролируемой сети. С целью повышения надежности защиты и уменьшения рисков, как правило, отключение производится при повторном определении факта снижения сопротивления изоляции последовательно при нескольких циклах измерения.

Устройство контроля сопротивления изоляции

На рис. 1 показана упрощенная принципиальная схема трехфазной электрической сети, поясняющая способ контроля сопротивления изоляции сети с изолированной нейтралью при наличии в сети тиристорного преобразователя ТП [10]. Напряжение $u(t)$ от управляемого источника тестового напряжения через звезду добавочных резисторов поступает в контролируемую трехфазную сеть. Ток, протекающий в контуре: «источник тестового сигнала» $u(t)$ – добавочные резисторы – сопротивление изоляции – земля, контролируется по величине падения напряжения на измерительном резисторе r_0 . Напряжение с измерительного резистора через усилитель поступает на вход микроконтроллера. Величина сопротивления изоляции вычисляется в зависимости от измеренного падения напряжения на измерительном резисторе и известного тестового напряжения.

Тестовое напряжение (рис. 2) представляет собой последовательность разнополярных импульсов специальной формы. В первом полупериоде в интервале времени $0 < t \leq \tau$ тестовое напряжение $u(t) = U_1$ обеспечивает ускоренный процесс перехода электрической системы в установившееся состояние, а именно, форсированный заряд ёмкостей в цепях переменного и постоянного тока. Аналогично во втором полупериоде в интервале времени $T < t \leq T + \tau$ тестовое напряжение $u(t) = -U_1$ обеспечивает ускоренный процесс перехода электрической системы в установившееся состояние, а именно, форсированный заряд ёмкостей в цепях переменного и постоянного тока.

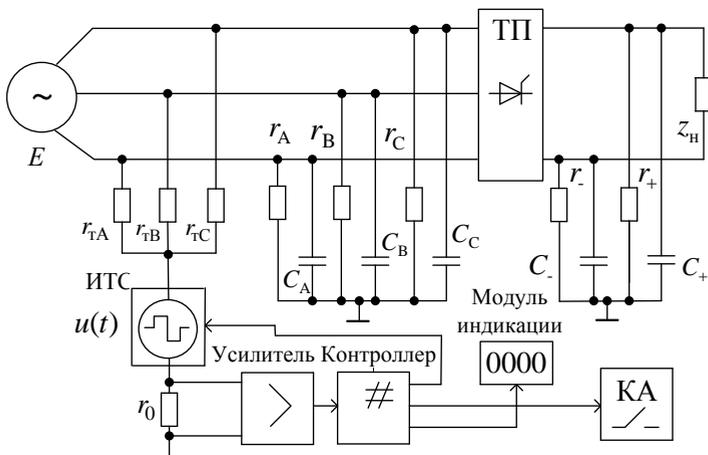


Рис. 3. Схема измерения сопротивления изоляции сети с тестовым импульсным напряжением: E – напряжение питающей сети; $u(t)$ – напряжение источника тестового сигнала ИТС; ТП – тиристорный преобразователь; КА – коммутационный аппарат; r_A, r_B, r_C – сопротивления изоляции шин переменного тока; C_A, C_B, C_C – ёмкости шин переменного тока; r_+, r_- – сопротивления изоляции шин постоянного тока соответственно с положительным и отрицательным потенциалами; C_+, C_- – ёмкости шин постоянного тока

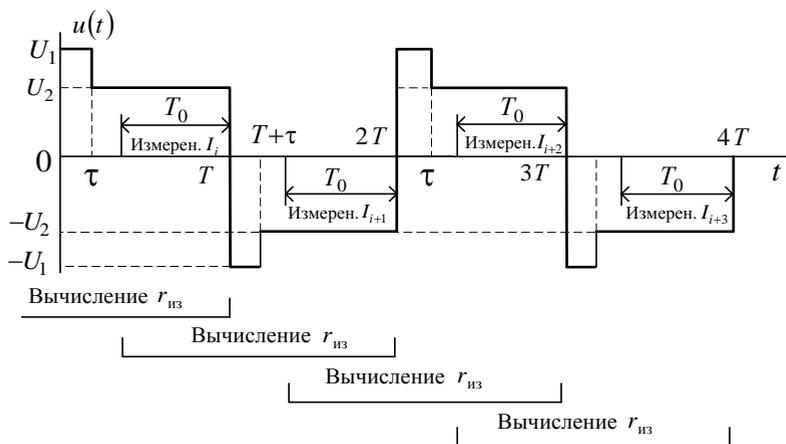


Рис. 2. Форма тестового импульсного напряжения

Источник тестового сигнала в течение интервала времени $\tau < t \leq T$ формирует постоянное напряжение $u(t) = U_2$. В установившемся режиме при условии, что $r_0 \ll r_T + r_{из}$, ток этого источника равен

$$I_1 = \frac{U_2 - U_{п}}{r_T + r_{из}}, \quad (1)$$

где $r_{из}$ — эквивалентное сопротивление изоляции сети, учитывающее сопротивление изоляции участков переменного и постоянного тока; $U_{п}$ — напряжение участка сети постоянного тока.

В течение интервала времени $T + \tau < t \leq 2T$ источник тестового сигнала формирует напряжение $u(t) = -U_2$. В этом случае ток источника равен

$$I_2 = \frac{-U_2 - U_{п}}{r_T + r_{из}}. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1) и (2) относительно $r_{из}$ дает формулу

$$r_{из} = \frac{2U_2}{I_1 - I_2} - r_T,$$

инвариантную относительно величины постоянного напряжения $U_{п}$ в предположении $u(t) = \pm U_2$, $U_2 = \text{const}$ в интервалах измерения. Токи I_1 и I_2 определяется путем усреднения падения напряжения на измерительном резисторе r_0 за период питающей сети T_0 (рис. 2).

В первом полупериоде цикла измерения в интервале $T - T_0 < t \leq T$ измеряется ток I_1 , а во втором полупериоде в интервале $2T - T_0 < t \leq 2T$ измеряется ток I_2 . Два последних измерения всегда сохраняются в памяти контроллера и используются для вычисления сопротивления изоляции $r_{из}$ после каждого i -го полупериода тестового напряжения по формуле

$$r_{из} = \frac{2U_2}{|I_{i-1} - I_i|} - r_T, \quad (3)$$

где r_T — внутреннее сопротивление источника, $i = 1, 2$.

В соответствии с формулой (3) после завершения первого полупериода ($i = 1$) текущего цикла для вычисления сопротивления изоляции используются значения тока I_0 и I_1 , измеренные соответственно во втором полупериоде предыдущего цикла и в первом полупериоде текущего цикла. После завершения второго полупериода ($i = 2$) текущего цикла для вычисления используются значения тока I_1 и I_2 , измеренные соответственно в первом и во втором полупериодах текущего цикла. Таким образом, дискретность измерения равна половине времени цикла, т.е. T . При выборе $T=30$ мс в течение времени $t = 3T = 90$ мс выполняется последовательно 3 измерения сопротивления изоляции.

Заключение

Рассмотренный способ контроля сопротивления изоляции в сетях ИТ переменного, постоянного и двойного рода тока, обеспечивает эффективную и безопасную работу электрооборудования. Устройство, реализующее способ, предназначено для применения в электроустановках и системах автоматизации горных предприятий и полностью отвечает всем требованиям нормативных документов. Различные варианты приборов серийно производятся Компанией «Объединенная Энергия», г. Москва.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов Е.А.* Безопасность электроустановок и систем автоматизации / Е.А. Иванов, В.Л. Галка, К.Р. Малаян. – СПб., ЭЛМОР, 2003. – 384 с.
2. *Бабокин Г.И.* Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции / Г.И. Бабокин, Д.М. Шпрехер, Е.Б. Колесников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. № 2. С. 34–45. Doi: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.
3. *Малафеев С.И.* Применение прогнозирующей модели для непрерывного контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев, Н.А. Серебренников // Контроль. Диагностика. 2012, № 10. – С. 57 – 60.
4. *Guedes A.S.* Insulation Protection and Online Stress Agent Identification for Electric Machines using Artificial Intelligence / A.S. Guedes,

S.M. Silva // IET Electric Power Applications. Vol. 13, Issue 4, 2019, pp. 559 – 570.

5. Малафеев С.И. Контроль сопротивления изоляции электрооборудования главных приводов карьерных экскаваторов / С.И. Малафеев, А.В. Анучин // Горный журнал, 2017, № 10. – С. 45 – 47. Doi: 10.17580/gzh.2017.10.

6. Wang Q. The method for Cable Insulation On-line Monitoring in MV Distribution Network / Q. Wang, Y. Li, J. Qin // 2018 International Conference on Power System Technology, 6-8 November 2018, Guangzhou, China, POWERCON2018 Paper No. 201804270000574, pp. 3586 – 3591.

7. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2014. – 182 p. Doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.

8. Малафеев С.И. Контроль сопротивления изоляции в цепях питания электроавтоматики: сети с изолированной нейтралью / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев // Автоматизация в промышленности, 2020, №2. – С. 16 – 20.

9. Малафеев С.И. Анализ электрической сети с преобразователем рода тока при нарушении сопротивления изоляции / С.И. Малафеев, Н.А. Серебренников, В.Г. Фролкин // Электротехника, 2004, № 12, с. 11 – 14.

10. Патент РФ № 2757068. МПК G01R31/52; G01R27/18. Способ контроля сопротивления изоляции в электрической сети двойного рода тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 11.10.2021. Бюл. № 29.

Авторы:

Малафеев Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Компании «Объединенная Энергия», г. Москва. Окончил в 1975 г. 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 Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. 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.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Петров В.Н., Свинцов Г.П., Фролов С.И., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Перечислены способы расчета магнитной проводимости рабочих воздушных зазоров в электромагнитах аппаратов управления, распределения и автоматики. Сформулированы недостатки расчета магнитной проводимости методом вероятных путей потока. Изложены математические аспекты расчета магнитной проводимости рабочего воздушного зазора модифицированным методом Ротерса. Приведена формула для расчета магнитной проводимости зазора, образованного круговыми полюсами.*

***Ключевые слова:** магнитная проводимость, рабочий воздушный зазор, модифицированный метод Ротерса, неравномерное магнитное поле, круговые полюса, электромагнит.*

Основные сведения

Точность расчета магнитной проводимости рабочих воздушных зазоров во многом определяет точность расчета магнитной цепи (ее кривых намагничивания), а значит и тяговых усилий электромагнита. Строгое аналитическое решение задачи расчета магнитных проводимостей Λ воздушных зазоров δ при отсутствии в них проводников с током может быть получено на основе уравнения Лапласа [1].

Если к двум рабочим поверхностям полюса электромагнита приложено магнитное напряжение U_M , то величина гнитного потока Φ , протекающего через полюса, определяется по формуле [2, 3]:

$$\Phi = \Lambda \cdot U_M \quad . \quad (1)$$

Когда линии индукции параллельны, а эквипотенциальные поверхности представляют собой плоскости, поле называется равномерным и магнитная проводимость равна [2, 3]:

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; S – площадь рабочей поверхности полюсов, δ – длина воздушного зазора. Однако во многих случаях реальных форм полюсов электромагнитов не удается получить строгих математических выражений для расчета магнитных проводимостей.

Чаще линии магнитной индукции распределяются неравномерно по рабочей поверхности полюсов и выражение (2) может быть применено лишь к элементу поверхности полюса. Поэтому проводимости определяют по формулам, полученным: 1) на основании упрощающих предположений относительно картины поля; 2) на основании математической обработки экспериментальных данных с применением теории подобия; 3) на основании картин поля, построенных графическим путем.

Одной из разновидностей первого способа определения проводимости является предложенный Ротерсом метод вероятных путей потока [2, 3]. По этому методу поле разбивается на ряд областей вероятного протекания магнитного потока. Проводимость каждого из путей протекания потока определяется по формуле:

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \cdot S_{\text{ср}}}{l_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{ср}}$ – средняя величина поперечного сечения на пути потока, $l_{\text{ср}}$ – длина средней линии магнитной индукции в рассматриваемой области поля.

Если $S_{\text{ср}}$ определить трудно, например, из-за сложности рассматриваемой области, проводимость рассчитывается по формуле

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \cdot V}{l_{\text{ср}}^2},$$

где V – объем рассматриваемой области поля.

В качестве областей вероятных путей потока используется несколько стандартных геометрических тел, таких, как полуцилиндр, полукольцо сферический квадрант, квадрант сферической оболочки или производные от этих форм. Полная прово-

димность Λ_{Σ} определяется суммированием проводимостей Λ_i отдельных областей:

$$\Lambda_{\Sigma} = \sum \Lambda_i . \quad (4)$$

Основным достоинством этого метода является то, что он позволяет достаточно просто определить проводимость многих форм полюсов электромагнитов.

Однако следует иметь ввиду, что при расчете Λ по простым формулам остается открытым вопрос определения $S_{\text{ср}}$ и $l_{\text{ср}}$. Таким образом, для устранения отмеченных недостатков этого метода формулы (2), (3) следует применять к достаточно малым элементарным областям поля с последующим суммированием проводимостей элементарных областей и получить аналогичные формулы для других геометрических тел.

Методика расчета магнитных проводимостей модифицированным методом Ротерса

Проводимость применительно к элементарному объему dV поля (рис. 1):

$$d\Lambda = \frac{\mu_0 \cdot dV}{l^2} , \quad (5)$$

где l – длина линий магнитной индукции, принимаемая неизменной в пределах элементарного объема dV магнитного поля. При этом проводимость Λ выделенной области, заключенной между поверхностями 1 и 2, определяется путем интегрирования выражения:

$$\Lambda = \mu_0 \int \frac{dV}{l^2} . \quad (6)$$

Для расчета Λ по выражению (6) необходимо значение длин линий магнитной индукции в любой точке поверхности S полюса. Вычисление l возможно, когда аналитически описана линия магнитной индукции.

Величина элементарного объема dV , заключенного между линиями индукции и поверхностями 1 и 2 (рис. 1), будет зависеть от его положения. Поэтому dV можно интерпретировать как дифференциал функции V объема выделенной области поля.

В тех случаях, когда можно допустить, что поле в рассматриваемой области объема плоскопараллельное протяженностью h , выражение (6) может быть представлено в виде

$$\Lambda = \mu_0 h \int \frac{dS}{l^2}, \quad (7)$$

где dS – площадь между двумя линиями индукции, лежащими в плоскости, перпендикулярной направлению размерной линии для величины h .

Функция под знаком интеграла в выражении (7) безразмерна. Значение интеграла может толковаться как безразмерная геометрическая проводимость Λ на единицу величины протяженности поля.

Проводимость зазора, образованного круглыми полюсами

Проводимость Λ будет определяться суммой проводимостей трех областей, магнитные потоки в которых протекают по параллельным путям:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3. \quad (8)$$

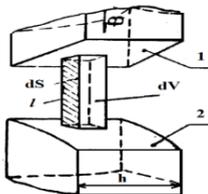


Рис. 1

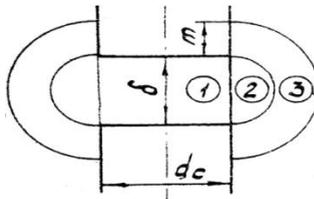


Рис. 2

Расчет первой области

Проводимость 1 области, представляющей поле между торцами сердечников, она принимается равномерной, и тогда на основании (2) можно записать:

$$\Lambda_1 = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta} \quad (9)$$

Расчет второй области

Область 2 получена вращением полуокружности, построенной как на диаметре δ , вокруг оси сердечника.

Рассмотрим сначала проводимость сферического квадранта. Линии индукции (рис. 3) представлены в виде дуг окружностей.

В данном случае элементарный объем dV получается при вращении заштрихованной плоской фигуры, ограниченной двумя дугами окружностей, вокруг оси OZ на угол $\pi/2$.

Объем тела, полученного вращением плоской кривой $y(z)$ вокруг оси OZ , может быть определен как

$$V = \pi \int y^2 dz \quad (10)$$

Кривая $y(z)$ описывается уравнением окружности:

$$(y - y_R)^2 + z^2 = R^2,$$

где R , y_R – радиус и абсцисса центра окружности. Тогда:

$y = \sqrt{R^2 - z^2} + y_R$, R и y_R определены в результате решения системы двух уравнений – уравнения окружности и условиями прохождения окружности через две точки с координатами $(0, d)$ и $(y_m, 0)$ (рис. 4):

$$R = \frac{y_m^2 + (0,5\delta)^2}{2y_m} \quad y_R = \frac{y_m^2 - (0,5\delta)^2}{2y_m}.$$

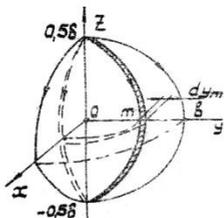


Рис. 3

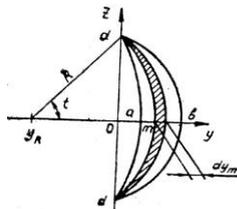


Рис. 4

Тогда:
$$V = \frac{\pi}{2} \int_0^{0,5\delta} (\sqrt{R^2 - z^2} + y_R)^2 dz =$$

$$= \frac{\pi}{2} \left[0,5\delta (R^2 + y_R^2) - \frac{(0,5\delta)^3}{3} + y_R \left(0,5\delta \sqrt{R^2 - (0,5\delta)^2} + R^2 \arcsin \left(\frac{0,5\delta}{R} \right) \right) \right].$$

Запишем дифференциал dV функции:

$$dV = \frac{\pi}{2} \left[\left(0,5\delta (R^2 + y_R^2) \right)' + \left(y_R 0,5\delta \sqrt{R^2 - (0,5\delta)^2} \right)' + \left(y_R R^2 \arcsin \left(\frac{0,5\delta}{R} \right) \right)' \right] dy_m$$

Длина дуги $l = 2R \arcsin\left(\frac{0,5\delta}{R}\right)$. По формуле (6) получаем:

$$\Lambda = \mu_0 \pi \delta$$

$$\Lambda = \mu_0 \frac{\pi}{4} \delta \int_0^{0,5\delta} \frac{4R \frac{y_R}{y_m} + \frac{y_R^2}{y_m \sqrt{1 - \left(\frac{0,5\delta}{R}\right)^2}} + \frac{R^3}{0,5\delta y_m} \left(1 + 2\left(\frac{y_R}{R}\right)^2\right) \arcsin\left(\frac{0,5\delta}{R}\right)}{\left(2R \arcsin\left(\frac{0,5\delta}{R}\right)\right)^2} dy_m.$$

Введем новую переменную $\arcsin\left(\frac{0,5\delta}{R}\right) = t$ и через неё выразим другие величины. Получим интеграл:

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \pi \delta}{8} \int_a^b \frac{-1,5Ct g(t) + 1,5Ct g^2(t)t + 0,5t}{t^2} dt.$$

Этот интеграл берется с помощью разложения в ряд. В частном случае при $y_m \in (0; 0,5\delta)$ $a = 0$ и $b = \pi/2$:

$$\Lambda = \mu_0 \pi \delta \cdot 0,0249.$$

Для сферы будет $\Lambda = \mu_0 \pi \delta \cdot 0,1001$.

Теперь рассмотрим картину проводимости с «ребра» кругового полюса. Линии индукции показаны стрелками (рис. 5) и описываются уравнениями дуг окружностей. При этом радиусы окружностей определяются выражениями:

$$R = \frac{y_m^2 + (0,5\delta)^2}{2y_m} Y_R = 0,5d_c + \frac{y_m^2 - (0,5\delta)^2}{2y_m}, \text{ где } Y_R = 0,5d_c + y_R.$$

Функция V аналогична и определяется:

$$V = 2\pi \int_0^{0,5\delta} y^2(z) dz.$$

Принимая во внимание вышеуказанные расчеты, после интегрирования получим:

$$V = 2\pi \left[0,5\delta \left(R^2 + Y_R^2 \right) - \frac{(0,5\delta)^3}{3} + Y_R \left(0,5\delta \sqrt{R^2 - (0,5\delta)^2} + R^2 \arcsin\left(\frac{0,5\delta}{R}\right) \right) \right].$$

Аналогично, находя dV , получим интеграл для Λ . Тогда общая проводимость:

$$\Lambda = \mu_0 \pi \delta \left[\frac{t^2}{30} + \frac{t^4}{420} + \frac{t^6}{4725} + \frac{t^8}{189 \cdot 264} + \dots \right. \\ \left. + \frac{d_c}{\delta} \left(\frac{t}{6} + \frac{t^3}{270} + \frac{t^5}{4725} + \frac{t^7}{14 \cdot 4725} + \dots \right) \right] \frac{b}{a}.$$

В частном случае при $y_m \in (0; 0,5\delta)$ $a = 0$ и $b = \pi/2$:

$$\Lambda = \mu_0 \pi d_c \left(0,1001 \frac{\delta}{d_c} + 0,2789 \right).$$

Расчет третьей области

Область поля ограничена поверхностями, полученными при вращении полуокружностей 1 и 2 вокруг оси OZ , и боковыми поверхностями цилиндрических полюсов с диаметром d_c (рис. 6). Из осевой симметрии полюсов можно заключить, что поле рассматриваемой области является плоскомеридианным.

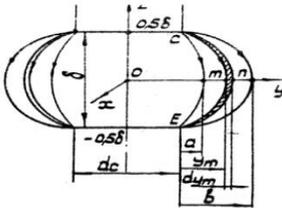


Рис. 5

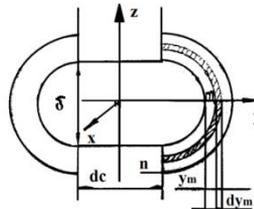


Рис. 6

Уравнение линий индукции в таком случае имеет вид:

$$y = \sqrt{R^2 - z^2} + 0,5d_c, \text{ где } R = 0,5\delta + y_m.$$

Объем тела, ограниченного поверхностью, полученной при вращении дуги полуокружности относительно оси OZ определим на основании:

$$V = 2\pi \int_0^R y^2(z) dz = 2\pi \int_0^R \left(\sqrt{R^2 - z^2} + 0,5d_c \right)^2 dz = \\ = 2\pi \left(\frac{2}{3} R^3 + \frac{\pi d_c}{4} R^2 + (0,5d_c)^2 R \right).$$

Аналогично, находя dV , получим результат для Λ .

$$\Lambda = \mu_0 \frac{2}{\pi} \left[2n + \frac{\pi d_c}{2} \ln \left(1 + \frac{n}{0,5\delta} \right) + \frac{(0,5d_c)^2 n}{0,5\delta(0,5\delta + n)} \right].$$

Тогда суммарная проводимость трех областей:

$$\Lambda = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta} + \mu_0 \pi d_c \left(0,1001 \frac{\delta}{d_c} + 0,2789 \right) + \mu_0 \frac{2}{\pi} \left[2n + \frac{\pi d_c}{2} \ln \left(1 + \frac{n}{0,5\delta} \right) + \frac{(0,5d_c)^2 n}{0,5\delta(0,5\delta + n)} \right].$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Свинцов Г.П. Расчет магнитных проводимостей рабочих воздушных зазоров электромагнитов: Методические указания к курсовым, дипломным работам и проектам / Г.П. Свинцов. –Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1990.– 32 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов по спец. «Электрические аппараты» / И.С. Таев [и др.]; Под ред. И.С. Таева. – М.: Высш. шк., 1987. – 352с.
3. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.

Авторы:

Петров Виктор Николаевич, старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета. В 2014 г. окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета. E-mail: rvn.chuvsu@yandex.ru.

Свинцов Геннадий Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета. В 1972 г. окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Моделирование и оптимизация электромагнитных приводов электрических аппаратов». E-mail: svintsov.47@mail.ru.

Фролов Сергей Иванович, старший преподаватель кафедры высшей математики и теоретической механики им. С.Ф.Сайкина Чувашского государственного университета. В 1980 году окончил физико-математический факультет Чувашского государственного университета. E-mail: frolchem@mail.ru.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Исхаков Р.Р., ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Научный руководитель – **Иванова В.Р.**, доцент, ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

***Аннотация.** В статье показана особенность системы технологической автоматизации новейших ПЛК Simatic S7-1500 для электроприводов подъемно-транспортных машин, проведен анализ систем управления электроприводами действующих шахтных подъемных машин горных комплексов.*

***Ключевые слова:** автоматизации, электропривод, шахтные машины.*

В статье показана особенность системы технологической автоматизации новейших ПЛК Simatic S7-1500 для электроприводов подъемно-транспортных машин, проведен анализ систем управления электроприводами действующих шахтных подъемных машин горных комплексов. Одним из основных путей повышения энергоэффективности МЛМ является замена старых асинхронных электродвигателей с фазным ротором на асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, предназначенные для работы в частотно-регулируемом электроприводе. Введение преобразователя частоты и системы управления электроприводом, которые в совокупности позволяют рекуперировать электроэнергию в питающей сети в режиме торможения генератора. Таким образом, система автоматизированного управления шахтной подъемной машиной на базе ПЛК Simatic S7-1500 с разработанным алгоритмом управления представляет собой интегрированную энергоэффективную систему управления, которую целесообразно использовать при управлении ШМ.

Электрооборудование подъемно-транспортных машин (ТТМ) работает в сложных условиях, связанных с запыленностью воздуха, вибрациями, в некоторых случаях с высокой температурой и высокой влажностью. Режим работы систем электропривода интенсивный многократный – кратковременный с частыми пусками,

реверсами и торможениями. Анализ существующего электрооборудования горных комплексов показал достаточно широкое применение асинхронных двигателей с фазным ротором (АМПР) для мощных (более 300 кВт) механизмов с тяжелыми пусковыми условиями (ЭП подъемно-транспортных механизмов, ЭП конвейеров и др.). На сегодняшний день управление производственным процессом на основе данных электромеханических систем осуществляется путем введения дополнительных активных сопротивлений в цепь ротора двигателя. Этот способ регулирования в наше время исчерпал себя из-за энергетической неэффективности. В настоящее время используются параметрические системы управления пуском и регулировкой скорости.

Применяемые в настоящее время системы параметрического управления пуском и регулировкой частоты вращения АМПЕР являются неэкономичными и не отвечают современным требованиям к динамическим показателям. Одним из основных способов повышения энергоэффективности ШМЭ является использование электродвигателей с короткозамкнутым ротором, предназначенных для работы в составе частотно-регулируемого электропривода. Внедрение преобразователя частоты и системы управления электроприводом, которые в совокупности позволяют восстанавливать электроэнергию в питающей сети в режиме торможения генератора. Таким образом, задача разработки и исследования энергоэффективного электропривода СХПМ с возможностью рекуперации электроэнергии является актуальной.

На сегодняшний день на горнодобывающих предприятиях идет процесс перехода от старых систем управления к более совершенным. Поскольку основными потребителями электроэнергии в промышленности являются электроприводы, этот процесс приобретает актуальную научную задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звозин Л.Ф. Шахтные подъемные установки.
2. Чудогашев Е.В. Шахтные подъемные установки: учеб. пособие.

Авторы:

Исхаков Рамиль Р., магистр ФГБОУ ВО «Казанский Государственный энергетический университет». E-mail: _iskhakovramil96@gmail.com.

Иванова Вилия Равильевна, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» ФГБОУ ВО «Казанский Государственный энергетический университет». E-mail: vr-10@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

Галиева Т.Г., Назарова А.Д., Иванов Д.А., ФГБОУ ВО КГЭУ, г.Казань, Россия

***Аннотация.** Существуют несколько типов изоляции: с фарфоровым корпусом, полимерные изоляторы, стеклянные электрические изоляторы. Для них характерны классификации дефектов, которые приведены в данной статье. Параметры, характеризующие дефект, должны выбираться с учетом количественного определения основных масштабов дефекта, чтобы локальная напряженность поля E в месте расположения дефекта учитывалось количественно.*

***Ключевые слова:** изоляторы, оконцеватель, разряды, дефекты.*

Электрические изоляторы предназначены для крепления шин, проводов, троллей и прочих токоведущих элементов к корпусу электроустановки, консолям опор и прочим конструкциям. Помимо этого, они изолируют проводники при прохождении через стены, позволяют отделить электроустановки друг от друга и прочие несущие функции.

В зависимости от места установки их подразделяют на внутренней и наружной. Также немаловажное значение играет класс напряжения, на который рассчитан тот или иной изолятор. Из-за чего будет отличаться его конструктивное исполнение и определенные технические характеристики, определяющие возможность их применения в тех или иных электроустановках.

В зависимости от способа крепления бывают: штыревого типа, подвесные и стержневые.

В зависимости от применяемого диэлектрика выделяют такие виды изоляторов: с фарфоровым корпусом, полимерные изоляторы, стеклянные электрические изоляторы.

Применяемые в настоящее время композитные полимерные изоляторы конструктивно представляют собой стеклопластико-

вый стержень или трубу, имеющий внешнюю полимерную изоляцию, и заделанные по торцам оконцеватели (опорные фланцы). Стеклопластиковый стержень или труба, выполняющий механические функции, обычно изготавливается из эпоксидных смол различных рецептов, армированных длинными стеклянными нитями. Внешняя полимерная изоляция, выполненная в виде кремнийорганической оболочки, защищает стеклопластиковый стержень или трубу от влияния внешних климатических факторов.

В большинстве полимерных изоляторов между компонентами присутствуют несколько поверхностей раздела. Поверхности раздела должны обеспечивать перенос механических нагрузок с одного материала на другой и быть устойчивыми к электрическому напряжению. Наиболее важной считается поверхность, на которой необходимо создать химическое соединение с запланированной надежностью в зоне оконцевателя, в которой происходит соприкосновение металлической арматуры, оболочки и воздуха (так называемая тройная точка).

В настоящее время на воздушных линиях и на подстанциях применяются следующие виды композитных полимерных изоляторов (рис. 1): 1) линейные; 2) линейные опорные; 3) опорные.

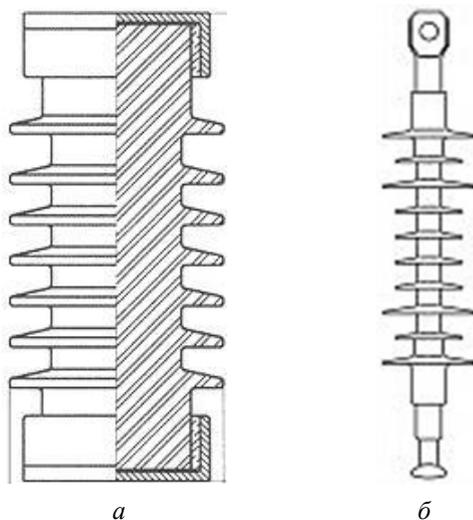


Рис. 1. Полимерные изоляторы: *а* – опорный, *б* – подвесной

С началом применения композитных полимерных изоляторов в электроэнергетических компаниях, естественно, возникли вопросы их надежности в условиях эксплуатации.

Высоковольтные изоляционные элементы – изоляторы – эксплуатируются в условиях высоких электрических полей, механических нагрузок, перепада температур и влажности. Естественно, в них в процессе эксплуатации возникают различные дефекты. Широко распространенным способом диагностики дефектов в высоковольтных изоляторах является метод частичных разрядов. Виды встречающихся типовых дефектов в изоляторах представлены на рис. 2.

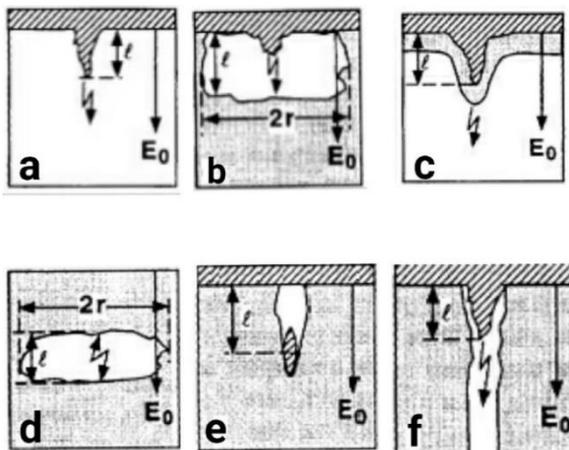


Рис. 2. Типовые дефекты высоковольтных изоляторов:
 l – длина дефекта, r – ширина дефекта, E_0 – напряженность внешнего
 высокого электрического поля

Схема классификации дефектов, описанная в этой статье, основана на характере двух основных границ, ограничивающих разряд. Первая граница ограничивает ЧР в направлении электрического поля и представлена в горизонтальном. Он варьируется от обеих границ, являющихся проводниками, до обеих границ, являющихся диэлектриками. Вторым критерием классификации является степень, в которой поверхности твердого диэлектрика, параллельные электрическому фоновому полю E , способствуют процессам разряда. Он представлен вдоль верти-

кальной оси и варьируется от незначительного (т.е. разряд развивается в основном через газ без поверхностного вклада) до доминирующего (т. е. в газовом разряде преобладают поверхностные явления). Любая конкретная система изоляции может содержать подмножество матрицы дефектов, изображенных на рис. 2, которая определяется такими факторами, как проектирование, производство, сборка и история эксплуатационных нагрузок.

Дефект на рис. 2, *a* представляет собой остроконечный выступ на металлических электродах изолятора, на конце которого возникают концентрация напряженности электрического поля, тем самым способствуя возникновению стримеров и коронных разрядов.

Дефект на рис. 2, *b* представляет собой возникновение газонаполненного зазора между стержнем или оболочкой изолятора и металлическими оконцевателями. В таком дефекте под действием внешнего высокого напряжения поляризуется диэлектрическая поверхность дефекта, генерируя разряд лишь в один из полупериодов высокого напряжения.

Дефект на рис. 2, *c* представляет собой разновидность дефекта на рис. 2, *a*. Отличительной особенностью дефекта такого типа является наличие локальной области изолятора, подверженной излишней поляризации под действием высокого напряжения.

Дефект на рис. 2, *d* представляет собой полость в теле диэлектрика. Противоположные поверхности полости под действием внешнего высокого напряжения поляризуются, на них образуются ионы и электроны, которые при смене полярности вызывают генерацию разряда.

Дефект на рис. 2, *e* представляет собой отслоение металлических частиц от оконцевателя. Механизм генерации разрядов в таком дефекте подобен дефекту на рис. 2, *b*.

Дефект на рис. 2, *f* представляет собой развитие дефекта, изображенного на рис. 2, *b*, диэлектрическая поверхность которого очень сильно деградировала и разрушилась под действием возникающих разрядов и могут привести к полному перекрытию изоляции.

Параметры, характеризующие дефект, должны выбираться с учетом количественного определения основных масштабов

дефекта, чтобы локальная напряженность поля E в месте расположения дефекта учитывалось количественно; и чтобы материалы, участвующие в процессе генерации ЧР, т. е. газ, твердые вещества и границы раздела между ними характеризовались минимальным количеством адекватно выбранных физических параметров. Набор параметров целесообразно разделить на геометрические – они характеризуют расположение дефекта в системе изоляции и его размер, физические – объемные свойства твердых и газообразных материалов, участвующих в разряде, и параметры взаимодействия при генерации разряда – изменение характеристик ионизации газа за счет поверхностных вкладов, эмиссии заряда с поверхностей дефекта и переноса заряда вдоль поверхностей.

Генерация частичного разряда, вызванная различными дефектами изоляции, в значительной степени обосновывается аналогичными физическими процессами. Это обеспечивает эффективный унифицированный подход к моделированию. Сложность модели может быть значительно снижена за счет введения упрощающих приближений без ущерба для физического содержания. В качестве особенно эффективного инструмента моделирования используется пространственное обоснование, которое заключается в установлении размерных соотношений между основными интегральными параметрами и учете деталей геометрии дефектов, структуры разряда и диэлектрических материалов с помощью коэффициентов пропорциональности. Моделирование процессов генерации ЧР позволяет оценить его измеряемые характеристики – начальное напряжение, фазы генерации, интенсивность заряда, распределение количества ЧР по фазе внешнего высокого напряжения. Кроме того, модель позволяет получить эмпирические соотношения для оценки количественной информации о дефектах из измеренных экспериментальных данных. При наличии количественной оценки параметров ЧР и динамике их изменений можно судить о развитии дефекта, деградации диэлектрического материала и ресурсе высоковольтного изолятора.

Благодарности:

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министрства науки и высшего образования Российской Федера-

ции в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (номер темы 075-00063-20-02).

ЛИТЕРАТУРА

1. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80–87.

2. А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов [и др.]. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 10-14.

3. А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов [и др.]. Комплексная бесконтактная диагностика работоспособности высоковольтных изоляторов // Дефектоскопия. – 2019. – № 8. – С. 34-40. – DOI 10.1134/S0130308219080049.

4. А.В. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов, Р.И. Калимуллин, А.В. Семенников. Дистанционно измеряемые диагностические параметры, позволяющие оценивать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 12. – С. 1763-1766.

5. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., & Galieva, T.G. (2021). Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies*, 14(18).

Авторы:

Татьяна Геннадьевна Галиева, ФГБОУ ВО КГЭУ, М.М.С., г. Казань, E-mail: 79534929817@ya.ru.

Назарова Анастасия Денисовна, ФГБОУ ВО КГЭУ, студент, г. Казань. E-mail: nastyanasarova3@gmail.com.

Иванов Дмитрий Алексеевич, ФГБОУ ВО КГЭУ, КТН доцент кафедры ПЭС, г. Казань. E-mail: divanale@gmail.com.

ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ЕЭС РОССИИ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Грабчак Е.П., Минэнерго России, г. Москва, Россия

Логинов Е.Л., Институт экономических стратегий,
г. Москва, Россия

***Аннотация.** Рассматриваются проблемы обеспечения национальной безопасности путем повышения живучести сегментов ЕЭС России на основе внедрения системы, позволяющей идентифицировать опасные электромагнитные воздействия на объекты электронной инфраструктуры с тем, чтобы принять своевременные меры по противодействию. Сформулированы характеристики формирования автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий базирующейся на использовании помехоустойчивых датчиков регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий.*

***Ключевые слова:** энергетика, электромагнитный импульс, угрозы, мониторинг, датчики, информационная система.*

Введение

Потребность в обеспечении живучести сегментов ЕЭС России делает меры по обеспечению безопасности инфраструктуры в энергетике Российской Федерации в условиях электромагнитных воздействий критически важными для национальной безопасности России [1; 2].

В связи с этим важной целью обеспечения национальной безопасности путем повышения живучести сегментов ЕЭС России стала разработка методов, позволяющих идентифицировать опасные электромагнитные воздействия на объекты электронной инфраструктуры с тем, чтобы принять своевременные меры по противодействию.

Формирование системы мониторинга электромагнитных воздействий

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Внедрение в ЕЭС России централизованной системы непрерывного мониторинга и контроля состояния оборудования и

информационно-управляющих систем, обеспечивающей своевременное информирование об обнаруженных нарушениях и потенциальных угрозах в работе интеллектуальных компонентов информационно-управляющих систем, а также выполняющей ряд задач аналитического характера, касающихся выявления источников преднамеренных электромагнитных воздействий на элементы электронной инфраструктуры электроэнергетики.

2. Внедрение на объектах энергетики помехоустойчивых датчиков регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий, осуществляющих в рамках автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий централизованный внешний контроль за состоянием оборудования и информационно-управляющих систем объектов энергетики.

3. Обеспечение стандартизации и сертификации энергетического оборудования на электромагнитную совместимость.

Выполнение этой задачи предполагает внедрение в ЕЭС России автоматизированной информационной системы (программно-аппаратного комплекса), интегрированной с используемыми помехоустойчивыми датчиками регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий.

Также предлагается интеграция с иными смежными системами диагностики технического состояния и работы оборудования [3].

Функции автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий

Система должна обеспечить:

– Сбор, регистрацию, накопление и обработку данных о работе интеллектуальных компонентов оборудования и информационно-управляющих систем ЕЭС России, примененных внешних электромагнитных воздействиях, значимых показателях работы смежных систем отраслевых комплексов (промышленность, связь, железные дороги и пр.) и прочих значимых факторов в целях последующего анализа.

– Возможность автоматического применения мер предотвращения угроз в случае выявления системой мониторинга и

контроля заданных сочетаний факторов, говорящих о наличии опасных электромагнитных воздействиях на объекты электронной инфраструктуры.

– Своевременное информирование - в автоматизированном режиме на основе получения данных от удалённых помехоустойчивых датчиков регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий - ответственных лиц в структурах энергетики о ситуациях, потенциально требующих внешнего вмешательства.

– Автоматизированный контроль работы информационно-управляющих систем ЕЭС России, а также персонифицированную регистрацию и контроль всех электромагнитных воздействий на указанные системы.

– Автоматизированный контроль технического состояния, срока использования и своевременной замены компонентов и механизмов регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий.

Аналитические сервисы автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий

Неотъемлемой частью системы является аналитический модуль, позволяющий на основе накопленных системой данных:

– выявлять скрытые электромагнитные атаки, влияющие на функционирование и работоспособность оборудования и информационно-управляющих систем, а также выявлять аномалии в функционировании систем и определять их источники;

– выявлять факторы риска, оценивать их значимость и, при необходимости, обеспечивать периодический мониторинг этих факторов (в том числе на основе многофакторных критериев);

– определять критерии для опережающего выявления ситуаций, требующих оперативного реагирования системы мониторинга и контроля электромагнитных воздействий в автоматическом режиме;

– проводить оценку стойкости цифровой инфраструктуры электроэнергетических объектов к электромагнитным воздействиям;

– проводить прогностический анализ потребности системы мониторинга и контроля электромагнитных воздействий в

обслуживании, ремонте и модернизации, а также осуществлять прогнозирование и контроль использования ресурсов для обеспечения работоспособности такой системы;

– выявлять случаи и режимы неоптимальной работы помехоустойчивых датчиков регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий.

Интеграция элементов системы в рамках специализированного центра – Ситуационно-аналитического центра Минэнерго России

Полноценное внедрение системы потребует, в том числе:

1. Разработки и уточнения регламентов деятельности персонала для управления элементами электроэнергетического оборудования в случае выявления датчиком воздействия электромагнитными импульсами критического характера.

2. Частичной интеграции системы (в части сбора информации о значимых для функционирования оборудования и информационно-управляющих систем данных) с другими сопутствующими техническими решениями для распознавания и ранжирования по степени опасности электромагнитных воздействий, преднамеренно осуществляемых с целью нарушения функционирования конкретных технических систем.

Различные элементы системы мониторинга и контроля электромагнитных воздействий, внедренные на различных объектах энергетики, могут быть удалённо интегрированы друг с другом под управлением специализированного центра – Ситуационно-аналитического центра Минэнерго России. Это позволит:

– усилить надежность контроля за состоянием информационно-управляющих систем за счет внешнего мониторинга;

– расширить возможности использования экспертных компетенций сотрудников в части оптимизации, повышения эффективности си поддержке функционирования оборудования и информационно-управляющих систем сразу на группу энергетических объектов;

– усилить аналитические функции системы за счет возможности сопоставления показателей по многим распределенным энергетическим объектам;

– обеспечить руководство (Минэнерго России и др.), в сферу ответственности которого входит группа объектов энергетики России не только агрегированной отчётностью по фиксированию электромагнитной атаки, но и определить её основные характеристики и выработать управляющие команды на внешние защитные системы.

Развитие системы мониторинга электромагнитных воздействий

Высокие требования, которые должны предъявляться к надёжности и бесперебойности оборудования и информационно-управляющих систем объектов энергетики, обуславливают необходимость задания их в специальном стандарте [4; 5]. То же касается решений в рамках автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий, а также ее комплектующих [6; 7].

Это обеспечит:

1. Полноценное функционирование всех внедрённых систем мониторинга и контроля оборудования и информационно-управляющих систем объектов энергетики [8].

2. Унификацию собираемых показателей и, следовательно, полноценные возможности агрегирования данных, их пообъектного сопоставления, а также возможности оптимизации деятельности по поддержке работы оборудования и информационно-управляющих систем по группам объектов [9].

3. Снижение стоимости проектирования, строительства, содержания и модернизации оборудования и информационно-управляющих систем объектов энергетики за счет унификации комплектующих, с повышенной стойкостью к электромагнитным воздействиям [10].

Также потребуется сформировать механизмы, обеспечивающие:

– контроль соответствия стандартам вновь создаваемых и модернизируемых видов оборудования и информационно-управляющих систем объектов энергетики;

– экспертизу технического уровня технических решений по повышению устойчивости оборудования к электромагнитным воздействиям.

Выводы

Таким образом, требуемый уровень надежности и работоспособности оборудования и информационно-управляющих систем как основы живучести сегментов ЕЭС России в условиях электромагнитных воздействий актуализировал задачу формирования автоматической системы мониторинга электромагнитных воздействий базирующуюся на использовании помехоустойчивых датчиков регистрации сверхпороговых уровней импульсных электромагнитных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Райков А.Н.* Планирование мер поддержания интерактивной коммуникации информационных систем с учетом угроз возможного коллапса управления экономикой в особый период / А.Н. Райков, А.А. Шкута // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 3. С. 79-86.

2. *Райков А.Н.* Управление экономикой России в условиях с предельно большой компонентой неопределенности развития чрезвычайных ситуации и критического недостатка информации / А.Н. Райков, А.А. Шкута // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 4. С. 104-110.

3. *Sorokin D.D.* The use of artificial intelligence's elements to block the manifestations of individuals' behavioral activity going beyond the quasi-stable states // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012028.

4. *Грабчак Е.П.* Противодействие угрозам воздействия электромагнитного импульса: стратегические подходы к защите критической энергетической инфраструктуры в США / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Вестник Российского нового университета, Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление», 2021, №2. С.74-84.

5. *Грабчак Е.П.* Комплексные подходы к защите систем автоматизации и информационных сетей сложных энергетических объектов от естественных или искусственных электромагнитных воздействий критического характера / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность–2020): материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. С.8-10.

6. *Грабчак Е.П.* Поддержание работы управляющих систем энергетической инфраструктуры в условиях воздействий электромагнитного импульса природного или техногенного происхождения / Е.П.

Грабчак, В.В. Григорьев., Е.Л. Логинов // Новые информационные технологии и системы. Сборник научных статей по материалам XVII Международной научно-технической конференции. - Пенза: Пензенский государственный университет, 2020. С.3-5.

7. *Грабчак Е.П.* Анализ и прогнозирование критических ситуаций в электро- и теплоэнергетике России на основе внедрения инновационных информационных сервисов / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Инновационная деятельность. 2019. № 4 (51). С. 24-28.

8. *Деркач А.К.* Формирование территориально распределенной сети катастрофоустойчивых дата-центров: концентрация защищенных систем управления в энергетике, адаптированных для работы в условиях чрезвычайных ситуаций и в особый период // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 5. С. 75-81.

9. *Bortalevich V.Y.* Intelligent monitoring, modelling and regulation information traffic to specify the trajectories of the behaviour of organizational agents in the context of receipt of difficult-interpreted information // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - P. 012015.

10. *Григорьев В.В.* Алгоритмы решения одной задачи определения оптимальной совокупности многоотраслевых комплексов. – М.: Вычислительный центр АН СССР. Москва, 1984. – 28 с. (Сер. Сообщения по прикладной математике)

Авторы:

Грабчак Евгений Петрович, кандидат экономических наук, заместитель Министра энергетики Российской Федерации, Минэнерго России. Закончил Московский физико-технический институт (государственный университет) по специальности «Прикладные математика и физика» в 2004 году. E-mail: grabchak.eug@gmail.com.

Логинов Евгений Леонидович, доктор экономических наук, профессор РАН, дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заместитель директора, Институт экономических стратегий. Закончил Кубанский государственный университет по специальности «Планирование промышленности» в 1989 году. E-mail: loginovel@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ «БАЙПАС» НА ВЛ 6(10) кВ

Михеев Г.М., Зиганшин А.Г., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Касымов Р.И., филиал АО Сетевая компания Чистопольские электрические сети, г. Чистополь, Россия

***Аннотация.** В работе рассматриваются ремонтно-конструкционные работы на воздушной линии 6-10 кВ с помощью системы «байпас», применяемые в России. Данная технология позволяет производить замену электрооборудования, опор, сценную арматуру без отключения электроснабжения потребителей.*

Ремонтные работы выполняются с использованием специализированных кабельных барабанов, силовых кабелей, общей протяжённостью до 500м., различных муфт, высоковольтных выключателей, опор кабельной перемычки, однополюсных разъединителей, монтажных зажимов, изолированных штанг, электропривода, бензогенератора и различных приспособлений.

В статье приведена схема системы «байпас» и изложены основные этапы проведения подготовки ремонтно-конструкционных работ на ВЛ-10 кВ. Подчёркнуто, что временная обходная линия электропередачи позволяет проводить аварийные и ремонтные работы в электроустановках, установленных на ВЛ с исключением недоотпуска электрической энергии, уменьшением электроавтоматизма, затрат труда оперативного персонала и т.д.

***Ключевые слова:** мобильный комплекс системы «байпас», модульное здание, выключатель нагрузки, однополюсный разъединитель, кабель силовой, кабельные выводы, монтажные зажимы, временная опора кабельной перемычки, заземление, изолированная штанга.*

В последние годы появились передовые методы по оперативному устранению неполадок и ремонтных работ на электросетевых предприятиях энергетики. Одним из этих методов является производство работ под напряжением (ПРН), который даёт возможность энергоснабжающей организации проводить ремонтные работы без отключения потребителя и обеспечить его тем самым, высокой надёжностью электроснабжения [1-3].

Другим, не менее эффективным методом проведения работ без отключения потребителя, является применение системы «байпас». За рубежом эту технологию применяют, например, в

Китае, Южной Корее, Японии [4-6]. Однако примеры использования такой системы в нашей стране практически отсутствуют. Пионером подключения временной обходной линии электропередачи на время проведения аварийных и ремонтных работ в электроустановках ВЛ-10 кВ без снятия напряжения и без отключения питания потребителей с использованием специализированных кабельных барабанов с электроприводом, позволяющих осуществить прокладку байпасной линии, являются филиал АО Сетевая компания Чистопольские электрические сети [7]. Сама система байпас изготовлена предприятием ООО Инженерный центр «ЭнергоРазвитие», г. Казань.

Система «байпас» размещается в двух модульных зданиях (основное и вспомогательное). В этих зданиях находятся два кабельных барабана, каждый из которых оснащён электроприводом. В них также имеются силовые кабели, снабжённые специальными наконечниками, комплекты кабельных выводов по 10 и 15 м соответственно, выключатель нагрузки, однополюсные разъединители, различные муфты, опоры кабельной перемычки, монтажные зажимы и т.д.

В зарубежных аналогах такой системы перевозка модульных зданий к месту его применения привязаны к конкретному автомобилю. В отличие от этого, в отечественном варианте, оборудование системы «байпас» не является стационарной частью конструкции комбинированного транспортного средства. Возможность перевозки модульных зданий на место назначения не зависит от технического состояния конкретного автомобиля, исправности приводов и механизмов, находящегося в непосредственном составе этой системы. Данное обстоятельство позволяет применять любую иную специализированную технику с соответствующими техническими характеристиками (грузоподъемность и габариты).

На рис. 1 представлена схема временной обходной линии электропередачи, позволяющая проводить аварийные и ремонтные работы в электроустановках ВЛ-10 кВ без снятия напряжения и без отключения питания потребителей.

Принцип действия системы «байпас» заключается в соединении байпасного кабеля с действующей линией электропередачи 10 кВ с использованием автогидроподъёмника с изолирован-

ным звеном (АГПИ). Для этой цели из модульного здания производится размотка кабеля по участку линии электропередач до планируемого места завершения ремонтных работ. Далее байпасный кабель соединяется с участком линии, остающимся под напряжением.

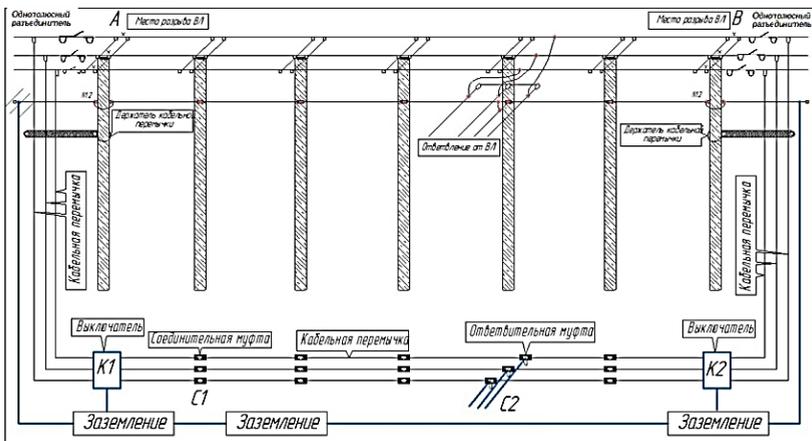


Рис. 1. Временная обходная линия электропередачи с ответвлением с помощью системы «байпас»

Перед началом процесса подключения к сети под напряжение, оголённые участки ВЛ следует изолировать. Для этого применяют средства коллективной защиты соответствующего класса защиты. После полной изоляции оголённых участков на струбцинах временной траверсы фиксируют кабельные выводы системы «байпас» длиной 15 м.

Временная траверса крепится к опоре ВЛ с помощью тяжёлых ремней с люльки АГПИ на расстоянии не менее 1 м. от изоляторов и электрических высоковольтных линий. Временная траверса необходима для предотвращения свисания проводов и снятия нагрузки с них, так как силовой кабель системы «байпас» имеет немалый вес.

Выводы кабелей на вершину опоры поднимают с помощью бесконечного каната. По завершению процесса фиксации кабельных выводов систему «байпас» подключают к ВЛ, путём применения изолированных струбцин, соблюдая чередование фаз.

В пролете опор до и после места присоединения обводного участка системы «байпас» на каждую фазу устанавливаются однопольные разъединители. Они предназначены для создания разрыва на участке ВЛ, выводимой в ремонт.

Разъединители устанавливаются с помощью системы зажимов «лягушка» для натяжения проводов по 2 шт. на каждый разъединитель. Его включение в сеть производится с помощью штанги. Штанга изолирована и имеет захватный механизм.

Со стороны потребителя производится установка монтажных зажимов на каждую из фаз. Монтажные зажимы фиксируются при помощи ременной лебёдки к опоре или траверсе опоры.

После полного подключения всей системы «байпас», перед подачей напряжения на неё, необходимо проверить правильность подключения фаз, надёжность фиксации и подключения кабелей.

Перед отключением действующей линии следует включить систему «байпас» под нагрузку путём коммутации выключателем нагрузки. На данном отрезке времени питание потребителя будет осуществляться по двум параллельным линиям.

Предварительно выключатель нагрузки крепится к телу опоры при помощи стальных ремней крепления груза. На каждый выключатель устанавливается два комплекта крепления ремней. После установки выключателя нагрузки её следует заземлить путём забивания заземляющего штыря в землю с последующим подключением к нему проводника от корпуса выключателя.

Только после подачи по параллельным линиям напряжения, ремонтируемый участок ВЛ отключается от сети и он выводится в ремонт. Для отключения линии применяется храповый механизм. Таким образом, на ремонтируемом участке прекращается подача напряжения. С этого момента потребители будут питаться от собранной системы «байпас».

Для работы на ВЛ с защищёнными проводами (ВЛЗ) система «байпас» подключается аналогичным образом. При этом для минимального нарушения изоляционного слоя струбины кабельных выводов подключаются к ВЛ через ремонтные прокалывающие зажимы или в зависимости от местных условий к

существующим соединениям, выполненные со снятием изоляции.

По окончании работ «байпас» выводится из схемы в обратной последовательности. Восстановление провода производится с применением соединительных зажимов и требований правил нормативно-технических документаций (НТД).

Выводы

Система «байпас» позволяет проводить комплекс операций по техническому обслуживанию, капитальному ремонту, аварийно-восстановительных работ электроустановок с увеличением безопасности, снижением трудоемкости процесса без прекращения электроснабжения потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фардиев И.Ш., Галимов А.И., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М., Работы под напряжением в электрических сетях. Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. 2021. – №2 – С. 52-59.

2. Богданов В.В., Богданов И.В., Сошинов А.Г. Инновационный подход в подготовке энергетиков нового поколения по производству работ под напряжением/Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. –2014. №11-4. – С. 537-540.

3. Богданов В.В., Богданов И.В., Сошинов А.Г. Энергосбережение при производстве работ под напряжением в распределительных сетях/Успехи современного естествознания.– 2014. № 12-2. – С. 86-88.

4. Патент КНР № CN201601404U/Мобильная установка для аварийного ремонта комплектной трансформаторной подстанции/ Хо Фэй, Чжан Цзыюй, Ин Ли, Хун Лян, Ван Хэн, Ло Ян/ Дата публикации: 06.10.2010.

5. Патент государства Япония № JP2002010418А/Передвижное устройство с газотурбинной установкой для обеспечения бесперебойной работы воздушных линий электропередач / Фурукава Масаюки, Мукай Фумитака, Яхаги Кейджи/ Дата публикации: 11.01.2002.

6. Патент Южная Корея № KR20080070293А/Устройство для бесперебойного- питания электроприемников с помощью байпасного оборудования размещенного на автомобиле / Ха Ен Сук, Ким Хен Чан, Ким Чай Гун/ Дата публикации: 30.07.2008.

7. Фардиев И.Ш., Касымов Р.И., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М. Ремонтно-конструкционные работы на ВЛ 6-10кВ с помощью системы байпас. Промышленная энергетика. 2021. – №10 – С. 21-25.

Авторы:

Михеев Георгий Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии, электроэнергетики и систем управления» Чебоксарского института филиала Московского политехнического университета. Окончил Чувашский государственный университет в 1982 году. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Автоматизированные ресурсосберегающие методы и приборы для диагностики высоковольтного электрооборудования». E-mail: mikheevg@rambler.ru.

Зиганшин Айрат Габдулхакович, аспирант кафедры «Электропитание и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Фёдорова» ЧГУ имени И.Н. Ульянова. Окончил Казанский государственный энергетический университет в 2006 году. E-mail: ZiganshinAG@gridcom-rt.ru.

Касымов Руслан Ильдусович, директор филиала АО Сетевая компания Чистопольские электрические сети, Россия, г. Чистополь. Окончил Казанский государственный энергетический университет в 2010 году. E-mail: KasimovRI@gridcom-rt.ru.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Гурьев В.К., Иванова С.П., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Постоянное удорожание стоимости материалов и электроэнергии для производства электрических аппаратов (ЭА), повышение требований к их надёжности и энергоэффективности, обостряющаяся конкуренция делает невыгодным изготовление технически устаревших энерго- и материалоемких конструкций. В связи с этим снижение расхода материалов, потребляемой электроэнергии, массогабаритных показателей (МГП), улучшение технических и функциональных параметров ЭА представляют насущную задачу в электротехнике.

Ключевые слова: электрические аппараты, электромагнитный привод, двухступенчатая, синхронная, гибридная коммутация, полупроводниковый ключ.

Согласно ГОСТ 27.002-2015 надёжностью является свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции и включает в себя, в частности, безотказность и долговечность. Применительно к электромагнитным ЭА наименее надёжной в процессе эксплуатации является контактная система (КС) из-за возникновения электрической дуги при коммутации, приводящей к значительному тепловыделению в межконтактном промежутке и ускоренному износу контактов с необходимостью их замены, а при отсутствии такой возможности, замены всего ЭА, что значительно увеличивает эксплуатационные затраты. В связи с этим для повышения коммутационной износостойкости целесообразно применять двухступенчатую коммутацию (ДК) расположенных параллельно друг другу главного (проводящего) низкоомного серебросодержащего и дополнительного (коммутирующего) дугостойкого на основе вольфрама контактов, замыкающихся и размыкающихся в определённой последовательности. Снижение негативных последствий влияния токовых перегрузок при коммутации осуществляется также синхронная коммутация (СК), при которой процесс замыкания и размыкания цепи происходит в момент прохождения тока через ноль. В итоге, применение технологий ДК и СК даёт возможность повысить электрическую износостойкость и отключающую способность ЭА и, соответственно, коммутировать большие токи и увеличивает в целом надёжность работы как коммутационного устройства, так и источника питания и подключённой нагрузки.

Многие годы электромагнитные ЭА, постоянно совершенствуясь и развиваясь, производятся параллельно и независимо от полупроводниковых (бесконтактных, электронных, статических) ЭА благодаря высокой перегрузочной способности, большому диапазону коммутируемых токов, разнообразию типов и количества контактов, высокому уровню нечувствительности к электромагнитным помехам, большой глубине коммутации, низкому уровню потерь мощности в проводящем состоянии, гальванической развязке между всеми контактами и обмоткой управления. В то же время электронные ЭА обладают рядом преимуществ по сравнению с контактными ЭА, в первую очередь это бездуговая коммутация электрических цепей, отсут-

ствие механического и электрического износа, высокое быстродействие и частота переключения, теоретически неограниченное время эксплуатации, возможность регулирования тока и напряжения [1, 2]. Стремление объединить в одном устройстве положительные качества как контактных, так и бесконтактных ЭА привело к созданию ЭА с гибридной коммутацией (ГК), в которых параллельно контактам подключён полупроводниковый ключ (ПК), шунтирующий коммутацию контактов. Включение и отключение цепи ПК производится с помощью блока управления либо при протекании тока через ноль. Прохождение тока через ПК не превышает нескольких миллисекунд и достаточно для расхождения контактов на расстояние, при котором достигается необходимая электрическая прочность межконтактного промежутка. Во включённом состоянии ток протекает только по замкнутым контактам, поскольку падение напряжения на контактах значительно ниже напряжения включения ПК. В результате отпадает необходимость не только в принудительном охлаждении полупроводников, но и в охладителях. Таким образом, по существу, механическим объединением контактных и бесконтактных коммутационных устройств в одной конструкции достигается удачное сочетание преимуществ обоих типов аппаратов и в то же время исключаются многие их недостатки [3]. Исходя из этого, гибридным ЭА присущи такие характеристики, как повышенные коммутационный ресурс и частота срабатывания, низкие потери электроэнергии при коммутации и длительном протекании номинального тока.

Благодаря разработке более чувствительных электромагнитных приводов (ЭМП) решается задача увеличения длины хода якоря и поднятия тяговой характеристики в тех же МГП. Тем самым появляется возможность увеличения начального рабочего зазора, провала контактов и силы контактного нажатия, обеспечивающих рост значений коммутируемых токов и напряжений, уменьшение сопротивления R_k и мощности потерь P_k контактов на пути прохождения тока I [4]:

$$P_k = I^2 R_k / 2.$$

При этом наряду с уменьшением переходного контактного сопротивления, снижающего нагрев в контактной области, повышается ток сваривания $I_{св}$ контактов:

$$I_{св} = k\sqrt{P},$$

где k – эмпирический коэффициент; P – сила контактного нажатия.

В итоге создаётся дополнительный полезный эффект при относительно равном или меньшем энергопотреблении ЭА, характеризующий повышение энергоэффективности, в частности:

- увеличение коммутируемой мощности при сохранении мощности управления либо уменьшение мощности управления при сохранении коммутируемой мощности либо увеличение коммутируемой мощности при уменьшении мощности управления либо опережающее увеличение коммутируемой мощности по сравнению с увеличением мощности управления;

- отсутствие (снижение) потерь на горение дуги в случае использования ДК, СК, ГК и их сочетаний;

- минимизация времени и температуры нагрева как КС, так и ЭМП за счёт увеличения быстродействия, применения схем форсированного управления, сокращая время энергопотребления на срабатывание и коммутационные процессы;

- применение магнитной или механической защёлки, дающей преимущество в энергосбережении в условиях непрерывной работы ввиду отсутствия необходимости в энергопотреблении во включённом состоянии;

- расширение функциональных возможностей применением электронных и микропроцессорных устройств управления ЭА;

- снижение эксплуатационных расходов за счёт отсутствия обслуживания в течение всего срока эксплуатации.

Повышению надёжности работы ЭА служат:

- увеличение количества коммутационных циклов при отсутствии (уменьшении) электрического износа контактов использованием технологий ДК, СК, ГК и их сочетаний;

- уравнивание подвижной части ЭА, повышая устойчивость к ударным и вибрационным воздействиям;

- ремонтпригодность благодаря взаимозаменяемости модулей и блоков;

- более высокая механическая износостойкость;

- отстройка от пусковых токов, кратковременных просадок и исчезновений напряжения, устойчивость к помехам в цепи питания.

Синтез всех этих условий и требований в одном устройстве требует новых решений, а также комплексного подхода к изучению и применению наработанного опыта в проектировании и эксплуатации ЭА.

Выводы

В целом по результатам анализа существующего уровня развития техники в области электроаппаратостроения выявлено, что повышению надёжности, энергоэффективности, технико-экономических и эксплуатационных показателей электромагнитных ЭА способствуют:

- конструирование ЭА с использованием передовых методов и методик проектного и оптимизационного расчётов, минимизирующее МГП и сокращающее сроки освоения изделия;

- реализация многофункциональности, включающая в себя коммутацию, защиту, диагностику, индикацию режимов работы, контроль, измерение, статистику, что повышает энергоэффективность, приводит к уменьшению занимаемой площади в низковольтных комплектных устройствах, упрощает и ускоряет монтажные и пуско-наладочные работы, снижая количество кабелей и проводов, требуемых для подключения;

- применение модульности построения, исключающего ошибки и сокращающего срок монтажных работ при сборке или установке дополнительных модулей благодаря отсутствию соединений проводами;

- дуальность управления (дистанционное и локальное, автоматическое и ручное, в режиме постоянной подачи электропитания и импульсном режиме, прямое и реверсивное);

- использование в силовой цепи ЭА технологий ДК, СК и ГК, а также ПК с повышенной нагрузочной способностью, улучшающих качество коммутации, в сочетании с электронными и микропроцессорными устройствами;

- повышение технологичности, снижение трудоёмкости изготовления, унификация исполнения и автоматизация производства серийных изделий, уменьшающих себестоимость и сроки изготовления;

- использование в изготовлении ЭА улучшенных и новых конструктивных решений, материалов и технологий.

Реализация этих возможностей в комплексе с передовыми научно-техническими и технологическими достижениями в области электроаппаратостроения открывают перспективы для дальнейшего обновления существующего парка отечественных электромагнитных ЭА в соответствии с современным уровнем развития техники и обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке, повышает надёжность и энергоэффективность ЭА нового поколения и создаёт необходимые условия для импортозамещения и энерго- и ресурсосбережения в отечественных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сосков А.Г., Соскова И.А.* Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: учебник для вузов / Под ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.: ил.
2. *Гуревич В.И.* Электрические реле. Устройство, принцип действия и применения. Настольная книга электротехника. Серия «Компоненты и Технологии». – М.: СОЛОН-Пресс, 2011. – 688 с.: ил.
3. Полупроводниковые электрические аппараты: Учебное пособие для вузов / *Кукеков Г.А., Васерина К.Н., Лунин В.П.* – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 256 с.: ил.
4. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Розанов Ю.К., Акимов Е.Г., Бурман А.П. и др.; Под ред. Розанова Ю.К. – М.: Информэлектро, 2001. – 417с.

Авторы:

Гурьев Виктор Константинович, аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». В 1989 году закончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова. E-mail: vikgur14@list.ru.

Иванова Светлана Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова». В 1994 году закончила электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова, в 2004 году защитила кандидатскую диссертацию по теме «Научное обоснование ускоренных испытаний магнитных пускателей на коммутационную износостойкость» в Московском энергетическом институте. E-mail: isp1970@mail.ru.

СИЛОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПОЛИМЕРАХ

Зайцев Ю.В., Мирошниченко А.Ю., Ковзик Н.С.,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, Россия

***Аннотация.** Рассматриваются и анализируются характеристики используемых в силовых конденсаторах диэлектриков-полимеров, для которых характерна способность восстанавливать свои функциональные характеристики в случае локального пробоя на отдельном участке диэлектрической пленки, которая используется в качестве диэлектрика в конструкции силового конденсатора. Показано, что указанным свойством обладают плёнки полипропилена, полиэстера, полиэтиленнафталата, полиэтиленсульфида.*

***Ключевые слова:** диэлектрики, полимеры, способность самовосстановления характеристик, локальный пробой, полипропилен, полиэстер, полиэтиленнафталат, полиэтиленсульфид, силовые плёночные конденсаторы.*

Интенсивное развитие силовой электроники в новом тысячелетии, а также рост производства устройств компенсации реактивной мощности, в использовании которых заинтересованы не только компании- владельцы распределительных сетей, но и коммерческие структуры с активно эксплуатируемыми производственными мощностями определили значительное повышение интереса к силовым плёночным конденсаторам. В целом это обусловлено преимуществами плёночных конденсаторов, для которых характерны:

- низкие показатели эквивалентного последовательного сопротивления и коэффициента рассеяния (используемые аббревиатуры, соответственно, ESR и DF), практическое отсутствие деградации по значению диэлектрических потерь, минимальные потери мощности;

- более высокая скорость разряда, плотность энергии. А также более рабочие температуры, чем у электролитических конденсаторов;

- уникальная способность самовосстановления при пробое благодаря быстрым сменам фазового состояния полимера (из твердого в парообразное и наоборот), что повышает живучесть и

долговечность эксплуатации плёночного конденсатора, конденсаторной батареи и всей установки компенсации реактивной мощности.

В настоящее время для конструкций силовых пленочных конденсаторов все более широко применяются полимеры, важной особенностью которых является способность восстанавливать свои функциональные характеристики (сопротивление изоляции, заданное значение емкости и т.п.) в случае локального пробоя на каком-либо участке диэлектрической пленки, которая используется в качестве изоляции в данном электротехническом изделии. Указанным свойством как показали исследования, обладают в различной степени плёнки стабилизированных полиолефинов, которые все более широко применяются для изоляции в силовых плёночных конденсаторах.

Несмотря на продолжающееся производство ограниченных объемов плёночных конденсаторов на базе металлизированной бумаги, что связывают с финансовой доступностью материала, специалисты прогнозируют постепенный вывод бумаги из производства из-за ее гигроскопичности и склонности к деградации, что определяет необходимость пропитки маслом, эпоксидной смолой и т.д., а значит повышение сложности и стоимости технологического процесса [1].

Наиболее широко используемыми полимерами-диэлектриками для силовых плёночных конденсаторов в настоящее время стали полипропилен (Polypropylen – PP), полиэстер (Polyester – PET), полиэтиленнафталат (Polyethylenaphtalat – PEN), полиэтиленсульфид (Polyphenylensulfid –PPS). Характеристики указанных полимеров-диэлектриков и плёночных конденсаторов на их основе приведены в табл. 1.

Отметим, что способность к самовосстановлению при локальном пробое электрода (за счёт расплавления электрической дугой и перехода в парообразное состояние полимера-диэлектрика, «обволакивания» и изоляции поврежденного участка электрода застывшим полимером) характерна только для металлизированных плёночных конденсаторов с толщиной металлизированного слоя не более 3/10 толщины диэлектрика. Самовосстановление также зависит от конструктивных особенностей конденсатора.

Таблица 1

Характеристики ряда полимеров-диэлектриков и конденсаторов на их основе

Характеристики диэлектриков	Полимеры				
	PEГ	PEN	PPS	PP	
Диэлектрическая проницаемость при 1 кГц	3,3	3,0	3,0	2,2	
Минимально допустимая толщина плёнки, мкм	0,7	0,9	1,2	3,0	
Поглощение влаги (гигроскопичность), %	низкое	0,4	0,05	<0,1	
Электрическая прочность, В / мкм	580	500	470	650	
Номинальное напряжение (постоянный ток), В	50 ... 1000	16 ... 250	16 ... 100	40 ... 2000	
Типовой диапазон ёмкости	100 пФ ... 22 мкФ	100 пФ ... 1 мкФ	100 пФ ... 0,47 мкФ	100 пФ ... 10 мкФ	
Максимальная рабочая температура, °С	125/150	150	150	05	
$\Delta C/C$ в диапазоне температур, %	± 5	± 5	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	
Тангенс угла диэлектрических потерь ($\times 10^{-4}$) для частот	при 1 кГц	50 ... 100	42 ... 80	2 ... 15	1 ... 5
	при 10 кГц	110 ... 150	54... 150	2,5 ... 25	2 ... 8
	при 100 кГц	170 ... 300	12... 300	12 ... 60	2 ... 25
	при 1 МГц	200 ... 350	-	18 ... 70	4 ... 40
Постоянная времени R Iso · C, сек	при 25 °С	≥ 10000	≥ 10000	≥ 10000	$\geq 100,000$
	при 85 °С	1000	1000	1000	10000
Диэлектрическая абсорбция, %	0,2 ... 0,5	1 ... 1,2	0,05 ... 0,1	0,01 ... 0,1	
Макс спец. ёмкость, нФ * В / мм З	400	250	140	50	

Таблица 2

Характеристики плёночных конденсаторов
с различными диэлектриками - полимерами

Диэлектрич. проницаемость (1кГц)	Электрич проч. V/μm	Макс. рабоч. температура, °С	Плотность энергии Дж/см ³	Диэлектрик
2.2	500	105	1-1.5	Polypropylen (PP)
3.3	400	125	1-1.5	Polyester (PET)
3.2	400	135	1-1.5	Polyethylenaphtalat (PEN)
3.0	360	200	1-1.5	Polyphenylensulfid (PPS)

Отметим, что способность к самовосстановлению при локальном пробое электрода (за счёт расплавления электрической дугой и перехода в парообразное состояние полимера-диэлектрика, «обволакивания» и изоляции поврежденного участка электрода застывшим полимером) характерна только для металлизированных плёночных конденсаторов с толщиной металлизированного слоя не более 3/10 толщины диэлектрика. Самовосстановление также зависит от конструктивных особенностей конденсатора.

Риски провоцирования локальным пробоем лавинообразных пробоев зависят от толщины диэлектрика в конденсаторе, поскольку в процессе образования плазмы на первом этапе «самооживления» прилегающие слои диэлектрика повреждаются и изменяют свои характеристики. В результате физико-химических процессов в полимере при самовосстановлении повышается внутреннее давление в корпусе конденсатора (особенно в силовых конденсаторах) и при определенном числе пробоев давление может достигать критических значений, что может вызывать повреждение корпуса конденсатора.

В РФ серия силовых пленочных конденсаторов выпускается Северо-Задонским конденсаторным заводом по ОЖ0.461.100ТУ, плёночные конденсаторы (народнохозяйственного назначения), аналогичные конденсаторы выпускаются за рубежом – немецкая компания Electronicon Kondensatoren GmbH является одним из ведущих производителей силовых плёночных конденсаторов, поставляя изделия по всему миру [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайцев Ю.В., Холодный Д.С., Рыбаков Д.А.* Материалы и элементы компьютерной техники -М.: изд-во Научного управления Объединённой Академии образовательных учреждений. 2014.-146с.

2. Силовые и прецизионные полистирольные конденсаторы К7 (высоковольтные плёночные). Рекламные издания. Северо-Задонский конденсаторный завод 2018-2020г.

3. *Зайцев Ю.В., Холодный Д.С., Мирошниченко А.Ю.* Материалы и элементы электронной техники Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2017.

Авторы:

Зайцев Юлий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: zzz6452@yandex.ru.

Мирошниченко Антон Юрьевич, канд. физ.-мат наук, доцент кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: anmir53@mail.ru.

Ковзик Никита Сергеевич, магистрант кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: kovzik.nikita@gmail.com.

IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЕК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА МАНЕВРЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Мицкевич Р.В., Рубан Н.Ю., Рудник В.Е., Бай Ю.Д., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

***Аннотация.** Использование надлежащих методов и подбор параметров настройки системы управления, позволяет преобразователям возобновляемых источников энергии (ВИЭ) имитировать динамику синхронных машин и влиять на скорость изменения частоты энергосистемы. В данной работе исследуется, как параметры настроек системы управления преобразователей солнечной электростанции (СЭС) влияют на процесс снижения частоты и динамические характеристики изолированного энергорайона.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, частота, синтетическая инерция, преобразователь, солнечная электростанция.*

1. Введение

В настоящее время одним из ключевых трендов развития электроэнергетических систем является внедрение ВИЭ. В ряде случаев ВИЭ занимали роли одних из преобладающих источников электроэнергии в части энергосистем. Таким образом существующей энергетике приходится считаться с влиянием внедрения ВИЭ на рынок электроэнергии. Как и с некоторыми техническими проблемами, связанными с запуском электростанций в автономной энергосистеме и управлением частотой и напряжением [1].

Одной из особенностей современных ВИЭ является применение вставок несинхронной связи с энергосистемой, на базе

силовых полупроводниковых преобразователей. Динамические характеристики преобразователей мощности отличаются от классических синхронных генераторов, существенно влияя на инерционные показатели энергосистемы. Таким образом, ввиду снижения инерции в зависимости от доли проникновения ВИЭ в энергосистему, возникают проблемы регулирования частоты, такие как увеличение предельного отклонения и скорости изменения частоты [2, 3].

Для решения этих проблем было предложено оптимизировать настройки систем управления преобразователей мощности, изменив коэффициенты регуляторов фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и интегрировав модуль синтетической инерции [3]. На рис. 1 представлена обобщенная схема подключения ВИЭ к энергосистеме и структура систем управления преобразователями с дополнительными надстройками [4].

В данной работе рассматривается модель солнечной электростанции (СЭС) подключенной к сети энергосистемы посредством инверторной связи, состоящая из DC-DC преобразователя и инвертора.

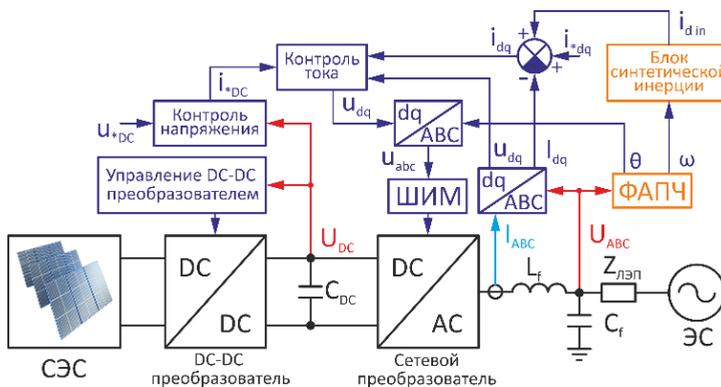


Рис. 1. Обобщенная схема подключения СЭС к энергосистеме и структура систем управления преобразователями

2. Описание структуры регуляторов модулей фазовой автоподстройки частоты и синтетической инерции

Модуль ФАПЧ в общем случае предназначен для синхронизации вращающейся dq системы координат сетевого преобра-

зователя с изображающим вектором напряжения системы U_c . Из сетевого напряжения U_c определяется информация о фазовом угле θ между осями α и d , а также величина угловой частоты ω , которые впоследствии используется в контурах управления [5]. Схема системы ФАПЧ представлена на рис. 2.

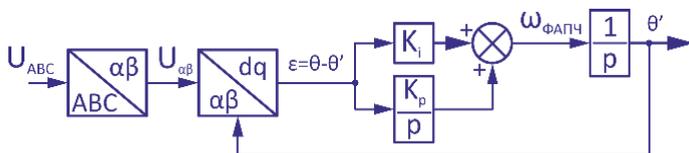


Рис. 2. Структурная схема системы фазовой автоподстройки частоты

Регулирующие импульсы модуля ФАПЧ напрямую влияют на динамику преобразователей мощности. Параметры K_i и K_p , пропорционально интегральных фильтров могут быть оптимизированы для обеспечения желаемых динамических характеристик при возникновении возмущающих воздействий в энергосистеме.

Применение дополнительных алгоритмов в системе управления преобразователями, позволяет эмулировать синтетическую инерцию [3, 6]. Параметры регуляторов разрабатываются индивидуально для каждой энергосистемы, для отстройки от неустойчивости, вызванной ограниченной полосой пропускания df/dt .

Входной величиной является сигнал угловой частоты от системы ФАПЧ, из которой определяется скорость ее изменения и отклонение от номинальной величины. Структурная схема модуля синтетической инерции представлена на рис. 3.

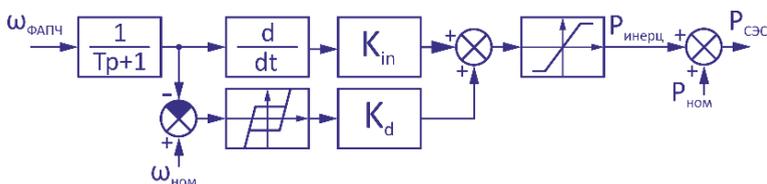


Рис. 3. Структурная схема модуля синтетической инерции

Настройка параметров регуляторов модуля синтетической инерции в системе управления сетевым преобразователем, обес-

печит реакцию снижающую скорость изменения частоты в энергосистеме.

3. Описание расчетной модели

Для проведения расчетных экспериментов была выбрана схема энергосистемы, состоящей из трех электростанций, две из которых представлены моделями ТЭС с классическими турбоагрегатами и одной моделью СЭС, подключенной через инвертор. Электростанции объединены в кольцевую сеть 110 кВ, в узлах которых расположена нагрузка.

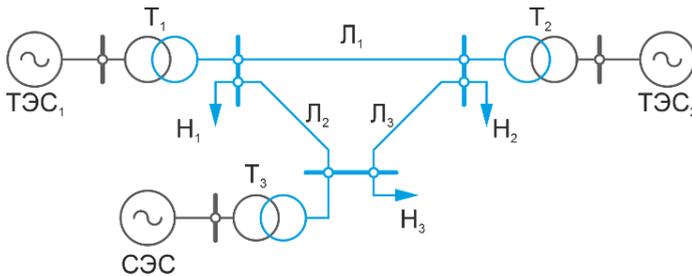


Рис. 4. Структурная схема энергосистемы

В нормальном режиме в энергосистеме обеспечивается баланс активной мощности, частота сети поддерживается на требуемом уровне 50 Гц регуляторами ТЭС.

Для оценки влияния настроек систем управления преобразователей СЭС на динамические характеристики энергосистемы, был принят сценарий наброса нагрузки H_3 при котором рассматривается процесс снижения частоты в энергосистеме.

4. Результаты экспериментов

В качестве изменяемых параметров приняты коэффициенты пропорциональных и интегральных регуляторов модулей ФАПЧ и синтетической инерции. Контролируемым параметром являлась величина частоты в исследуемой энергосистеме.

В результате проведения вычислительных экспериментов на модели энергосистемы, были получены осциллограммы процесса снижения частоты при различных значениях коэффициентов регуляторов системы ФАПЧ и модуля синтетической инерции, которые представлены на рис. 5 и 6.

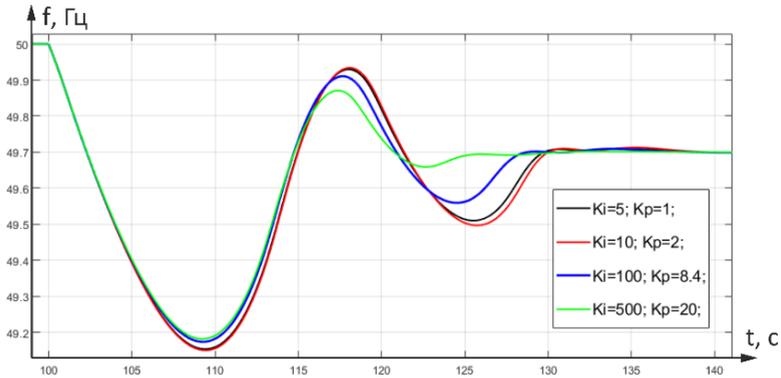


Рис. 5. Осциллограммы частоты при различных настройках модуля ФАПЧ

При увеличении коэффициентов регуляторов модуля ФАПЧ K_i и K_d и выдерживая определённое пропорциональное соотношение между ними, возможно добиться увеличения демпфирования колебаний частоты. Для достижения требуемого эффекта, значения коэффициентов необходимо увеличивать на порядки.

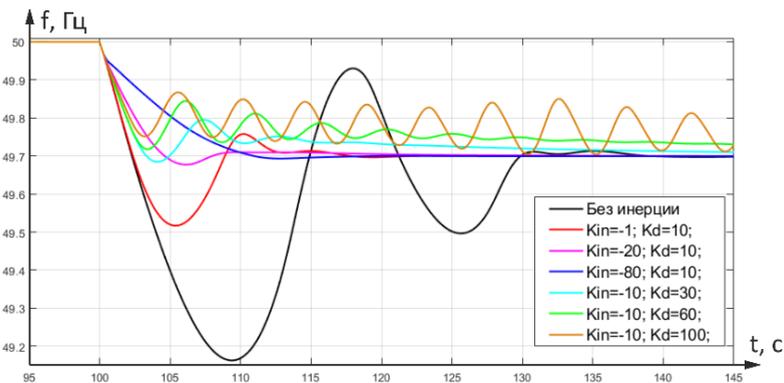


Рис. 6. Осциллограммы частоты при различных настройках модуля синтетической инерции

При увеличении модуля коэффициента K_{in} регулятора в канале скорости изменения частоты, значительно уменьшается

предельное отклонение частоты и увеличивается постоянная времени процесса снижения частоты.

При увеличении коэффициента K_d регулятора в канале отклонения частоты, устойчивость системы управления нарушается и возникают колебания частоты вследствие перерегулирования и неправильной работы силовых преобразователей.

Выводы

Для исследования влияния настроек системы управления силового преобразователя СЭС, в данной статье были рассмотрены модули ФАПЧ и синтетической инерции. Применение элементов систем управления силовыми преобразователями оказывает существенное влияние на процессы снижения частоты в энергосистеме. В частности, повышая демпфирующие характеристики и значительно увеличивая величину инерции энергосистемы.

Таким образом значительно улучшаются маневренные характеристики, повышая устойчивость энергосистемы и надежность электроснабжения.

Данная работа может быть применена в качестве рекомендаций для проектирования систем регулирования и управления силовыми установками возобновляемых источников энергии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-5320.2021.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Loutan C, Klauer P, Chowdhury S, Hall S, Morjaria M, Chadliev V., Demonstration of essential reliability services by a 300-MW solar photovoltaic power plant. Golden, CO: Nat. Renewable Energy Lab. 2017. –58 с.
2. Tong Chen, Jinrui Guo, Balarko Chaudhuri, S.Y. Hui., Virtual Inertia from Smart Loads. IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. С. 4311-4320.
3. Asma Aziz, Aman Than Oo, Alex Stojcevski. Frequency regulation capabilities in wind power plant. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2018. С. 47-76.
4. Zunaib Ali, Nicholas Christofides, Lenos Hadjidemetriou, Elias Kyriakides, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg. Three-phase phase-locked loop synchronization algorithms for grid connected. renewable energy systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. С. 434-452.

5. *Vlatko Miskovic, Vladimir Blasko, Thomas M. Jahns, Robert D. Lorenz, Per M. Jorgensen. Linear Phase-Locked Loop. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2018. С. 5677- 5683.*

6. *Shutang You. Photovoltaic (PV) Virtual Inertia and Fast Frequency Regulation in High PV Power Grids. Electrical Engineering and Systems Science. 2020. С. 1-6.*

Авторы:

Мицкевич Роман Викторович, магистрант инженерной школы энергетики, Томского политехнического университета. В 2020 году получил диплом о присуждении степени бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: rvm10@tpu.ru.

Рубан Николай Юрьевич, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Томского политехнического университета. В 2014 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Средства всережимного моделирования высококачественной дифференциально-фазной защиты линий электропередачи». E-mail: rubanny@tpu.ru.

Рудник Владимир Евгеньевич, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета. В 2019 году получил диплом с отличием о присуждении степени магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: ver3@tpu.ru.

Бай Юлий Дмитриевич, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Томского политехнического университета. В 2018 году окончил аспирантуру Томского политехнического университета по специализации «Электротехнические комплексы и системы». E-mail: nodius@tpu.ru.

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

Виралайнен А.В., ПетрГУ Физико-технический институт,
г. Петрозаводск, Россия

Научные руководители: Петрушин Д.Е., преподаватель;
Кулдин Н.А., кандидат физико-математических наук, доцент

***Аннотация.** В работе определена актуальность распределённой генерации (РГ), а также изучены перспективы развития РГ в Российской Федерации до 2035 г. Построены несколько сценариев, включая негативный, по которому сделан вывод о развитии РГ в России.*

***Ключевые слова:** распределённая генерация, возобновляемые источники энергии, промышленное предприятие, генерирующая установка, Единая энергетическая система, технологическое присоединение, система накопления электроэнергии, промышленное предприятие.*

В настоящий момент времени для нашей страны характерна модель централизованной генерации. Такая схема обусловлена большими расстояниями между источниками и потребителями электроэнергии, а также неоднородностью распределения первичных энергоресурсов (нефть, газ, уголь, крупные реки). Модель распределённой энергетики предполагает размещение небольших источников тепловой и электрической энергии вблизи мест потребления, без передачи этой энергии на большие расстояния.

Объект РГ – электростанция, состоящая из одной или нескольких генерирующих установок (ГУ), подключаемая к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлу(-ам) электропотребления, работающая параллельно с электроэнергетической системой или в островном (автономном) режимах, имеющая в точке общего присоединения суммарную установленную мощность до 25 МВт и использующая для производства всех видов энергии (электрическая, тепловая и др.) любые первичные источники энергии, включая возобновляемые.

Широкое развитие и распространение РГ в РФ объясняется рядом факторов. Одним из факторов на макроуровне является запрос на повышение энергоэффективности и снижение общей

стоимости процесса производства, распределения и потребления электроэнергии. Также страна стремится снизить зависимость своей экономики от углеводородов и диверсифицировать источники энергии. Ещё одним важным фактором развития РГ является постепенное устаревание основных производственных фондов в электроэнергетике, необходимость замещения устаревшей и зачастую неэффективной генерации, а также необходимость строительства новой генерации. Отдельным фактором появления РГ является наличие ограничений пропускной способности распределительных сетей и высокая стоимость подключения к ним. Использование РГ решается задачу с электроснабжением удалённых, изолированных и необустроенных территорий.

В настоящее время в РФ функционирует 487 генерирующих объектов (ГО) РГ, с общей установленной мощностью 6 ГВт, работающих в составе Единой энергетической системы (ЕЭС). В общем объёме РГ занимают МГЭС (малые ГЭС), их насчитывают около 76 объектов, общей установленной мощностью 480 МВт. Без учёта МГЭС в РФ на 2020 г. находится в эксплуатации 59 ГО на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) установленной мощности менее 25 МВт, из них 11 ВЭС, 46 СЭС, 1 ПЭС (приливная электростанция), 1 БиоТЭС.

Ряд различных факторов делают стоимость электроэнергии для конечного потребления достаточно высокой. По расчётам среднее прогнозируемое повышение цен на электроэнергию для бытового потребителя до 2035 г. составит около 4 %. С другой стороны, цена на природный газ для промышленности по прогнозам до 2024 г. значительного роста иметь не будет и будет составлять в среднем 3 % в год. Это создаёт благоприятные условия для развития собственной генерации промышленных предприятий (ПП) и муниципальными предприятиями и увеличение общего количества РГ, работающей на углеводородном топливе.

По мнению экспертов, наиболее значимыми критериями, влияющими на развитие РГ в РФ, являются: развитие системы накопления электроэнергии (СНЭ) до промышленного масштаба, усиление государственной поддержки РГ на основе ВИЭ, достижение научно-технического прогресса на всех стадиях: от производства энергоресурсов до преобразования их в энергию, ускорение развития отечественного энергомашиностроения для

РГ при сохранении ограниченного трансфера технологий. Также было отмечена высокая вероятность наступления следующих событий в перспективе до 2035 г.: постепенное повышение внутренних цен на газ для потребителей, ввод высоких штрафов за выбросы вредных веществ в атмосферу или за вредное физическое воздействие, достижение ведущими державами планов по декарбонизации, развитие СНЭ до промышленного масштаба.

Базовый сценарий предполагает естественный ход научно-технического процесса (НТП), который обеспечивает по мере внедрения новых технологий их постепенное удешевление. Доля нефти к 2035 г. сократится, а газ расширит свою нишу, именно это поддержит развитие РГ на основе природного газа. Спрос на мощность будет расти (в настоящее время в ЕЭС РФ наблюдается незначительный избыток мощности). Экспорт энергии снизится из-за высоких темпов роста цен на электроносители и на электроэнергию на внутреннем рынке. Базовый сценарий предполагает получение квалифицированного персонала к 2035 г. из-за внедрения больших объёмов РГ. В итоге произойдёт увеличение темпов роста объектов РГ на основе ВИЭ – в силу удешевления технологий, повышения конкурентоспособности и благодаря господдержке. При этом доля РГ на основе ВИЭ будет меньше доли газовой генерации. Увеличение потребления тепловой энергии обеспечит масштабное жилищное строительство в крупных городах и развитие теплоёмких отраслей промышленности. Доля централизованного теплоснабжения сократится. Важный фактор для развития РГ – стоимость электроэнергии. Чем выше цена электроэнергии для конечных потребителей и чем ниже плотность населения – тем больше прогнозируемая доля РГ в регионе.

Позитивный сценарий предполагает снятие барьеров для развития РГ, что приведёт к активному повсеместному внедрению объектов РГ. Прогнозируется ежегодное увеличение спроса на мощность. Также прогнозируется снижение профицита мощности. Позитивный сценарий составлен с учётом устранения значительной части «запертой» мощности в результате сетевого строительства, снижения технологических ограничений установленной мощности и успешной реализации всех плановых вводов мощности. Позитивный сценарий предполагает, что рынок тру-

да пополнится квалифицированными специалистами. В итоге переход на РГ изменит структуру энергетики: энергосистема станет локально децентрализованной. Основная выработка энергии производится за счёт энергокластеров, а централизованное энергоснабжение выполняет роль резервирования мощности.

Негативный сценарий предполагает сохранение текущих и появление новых барьеров развития РГ. Предполагается ежегодное снижение потребления мощности. Такой сценарий предполагает до 2035 г. отсутствие плановых вводов генерирующего оборудования и сохранение значительной части существующих ограничений мощности. Прогнозируется снижение профицита мощности с появлением дефицита на горизонте 2035 г. Негативный сценарий предполагает острую нехватку квалифицированного персонала. Строительство РГ становится экономически невыгодным. При негативном сценарии отсутствуют какие-либо существенные технические и технологические успехи, способствующие удешевлению строительства и эксплуатации объектов РГ. Снижается объём государственной поддержки строительства объектов РГ. Возрастающий спрос на электрическую и тепловую энергии покрывается за счёт имеющихся и строящихся объектов централизованного энерго- и теплоснабжения.

В заключение по сценариям можно сказать, что базовый сценарий – самый актуальный путь развития РГ в РФ до 2035 г. На рис. 1 представлен прогноз ввода РГ до 2035 г.

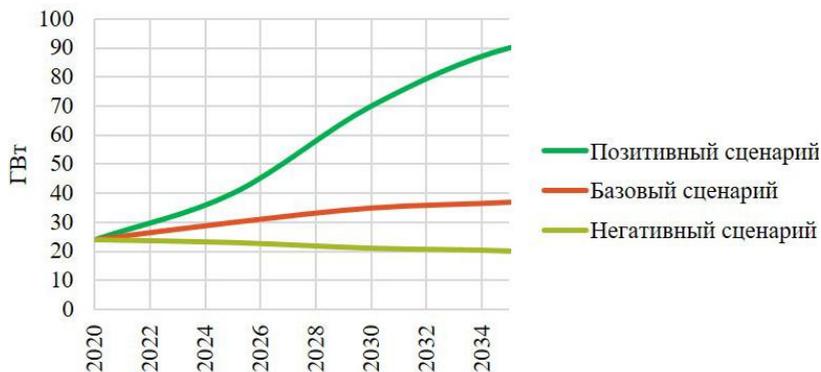


Рис. 1. Прогноз ввода РГ в РФ до 2035 г.

Распределённая энергетика – технологический тренд, который меняет электроэнергетическую отрасль в глобальном масштабе. Для РФ характерно широкое распространение РГ на углеводородной базе. ПП выбирают развитие собственной генерации мощностью до 25 МВт на основе углеводородного топлива. Развитие РГ на основе ВИЭ в РФ носит добавочный характер и составить конкуренцию централизованной энергетике в перспективе до 2035 г. не сможет. Такая генерация нужна для электроснабжения ИТТ. Зато развитие данной генерации определило вектор развития отрасли промышленного производства оборудования ВЭС и СЭС. Параллельная работа большого количества РГ создаёт определённые негативные последствия для технической и технологической составляющей ЕЭС. Необходимость обеспечения устойчивости работы требует разработки новых систем и устройств релейной защиты, сетевой и противоаварийной автоматики. Все это создаёт вызовы для отечественной энергетике, промышленности и научных организаций, отвечая на которые, отрасль формирует новые рынки сбыта и обеспечивает развитие смежных отраслей экономики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Накопители энергии [Электронный ресурс]: // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – 2020. – Режим доступа: <https://energy.hse.ru/accenergy>, свободный.
2. Сидорович В. Экономика солнечной энергетике: очень дешево, но будет намного дешевле [Электронный ресурс]: // RenEn — Renewable Energy — Возобновляемая Энергетика. – 2019. – Режим доступа: <https://renen.ru/solar-economics-very-cheap-but-will-be-much-cheaper/>, свободный.
3. Что даёт собственная генерация предприятию [Электронный ресурс]: ООО «Группа компаний «МКС» – 2019. – Режим доступа: <https://mks-group.ru/a/sobstvennaya-generaciya-na-predpriyatii>, свободный.
4. Отчёт о ходе реализации отобранных инвестиционных проектов участников ОРЭМ – генерирующих компаний в рамках ДПМ ВИЭ и ДПМ ТБО (за 1 квартал 2020 года) [Текст]: // АО «ЦФР». – 2020. – Режим доступа: <https://cfrenergо.ru/upload/iblock/d3f/Otchet-na-sayt-1-kvartal-2020-goda.pdf>, свободный.
5. Гуревич Ю.Е. Особенности расчётов режимов в энергорайонах с распределённой генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.

Авторы:

Виролайнен Алёна Владимировна, студентка 4 курса физико-технического института Петрозаводского государственного университета. E-mail: alenavirolaunen@mail.ru.

Научные руководители: Петрушин Д.Е., преподаватель; Кулдин Н.А., кандидат физико-математических наук, доцент.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SCADA-СИСТЕМЫ TRACE MODE ДЛЯ КОНТРОЛЯ СКН ПО ВАТТМЕТРОГРАММЕ

Генин В.С., Васильева Л.Н., Шарафутдинов Н.Р.,
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени
И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия

Аргыкаева Э.М., ГБОУ ВО Альметьевский государствен-
ный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия

***Аннотация.** В статье рассмотрены возможности контроля работы станков - качалок нефти, широко применяющихся при эксплуатации нефтяных месторождений, с использованием ваттметрограммы в SCADA-системе TRACE MODE.*

***Ключевые слова:** автоматизированная система управления, SCADA – система.*

SCADA-система TRACE MODE компании AdAstrA Research Group предназначена для автоматизации промышленных предприятий, энергетических объектов, интеллектуальных зданий, объектов транспорта, систем энергоучета и т.д. [1]. Она используется во многих отраслях промышленности России. Масштаб систем автоматизации, создаваемых в TRACE MODE, может быть любым – от автономно работающих управляющих контроллеров и рабочих мест операторов (АРМ), до территориально распределенных систем управления, включающих десятки контроллеров и АРМ, обменивающихся данными с использованием различных коммуникаций – локальная сеть, интранет/интернет, последовательные шины на основе RS-232/485, выделенные и коммутируемые телефонные линии, радиоканал и GSM/GPRS-сети.

В состав SCADA TRACE MODE программного комплекса включены всевозможные инструментальные системы, предназначенные для создания графического интерфейса проекта АСУ и наборы исполнительных модулей. Исполнительным модулем SCADA/HMI системы TRACE MODE является монитор текущего времени MPB, который включает в себя графический клиент и сервер текущего времени позволяющий запустить разработанный проект и поддерживать его функционирование.

Что касается архитектуры системы TRACE MODE, то это архитектура клиент-сервер, использующая общую объектную модель DCOM для Windows. TRACE MODE основан на мощном сервере и базе данных в реальном времени. Базовые особенности системы TRACE MODE:

- модульная структура с количеством каналов от 128 до 64 000×16;
- встроенная поддержка российских контроллеров Ремиконт, Ломиконт, Ш711, КРУИЗ, МФК, ЭК2000 и другие;
- поддержка международного стандарта средств программирования для контроллеров IEC 61131-3;
- библиотека драйверов для контроллеров от Rockwell Automation, Siemens, Schneider Electric, Moeller, Fisher Rosemount и др.;
- средства программирования на базе ПК для контроллеров MIC2000, ROBO, Lagoon, TREI и другие;
- встроенная система из более чем 150 алгоритмов системы управления, включая алгоритмы фильтрации, PI и PID управление, нечеткое и позиционное управление, преобразование PWM и другие, а также адаптивное управление регуляторами;
- открытость для встраивания пользовательских алгоритмов и форм отображения ActiveX;
- возможность резервного копирования локальных сетей, датчиков, архивов с автоматическим восстановлением после сбоя.

В состав пакета SCADA TRACE MODE входят средства разработки графического экрана, реализующегося путем создания совокупности взаимосвязанных технологических и динамических объектов (гистограмм, трендов, бегущих дорожек и т.д.). Также в программный пакет входит библиотека объектов (ре-

зервуары, теплообменники, кнопки и т.д.), позволяющая разрабатывать мультиструктурный графический интерфейс.

При разработке многоструктурного графического интерфейса пользователю дается возможность осуществлять связь с офисными приложениями, такими как Excel, Access, MS SQL Server, Oracle и другими приложениями Windows по протоколам TCP/IP, IPX/SPX, DCOM, DDE/NetDDE, OPC. В таком раскладе пользователь может написать собственные алгоритмы на языке Visual Basic (VB) и встроить их в Trace Mode с последующей отладкой созданного проекта в режиме реального времени.

На сегодня, TRACE MODE – это отечественная высокотехнологичная SCADA-система среднего класса, одна из наиболее покупаемых в России для разработки крупных диспетчерских комплексов и программирования PC-контроллеров. Она имеет все необходимое для создания АСУ ТП мирового уровня.

В качестве примера рассмотрим некоторые возможности контроля работы станков - качалок нефти (СКН), широко применяющихся при эксплуатации нефтяных месторождений, с использованием ваттметрограммы в SCADA-системе TRACE MODE.

В мировой практике для контроля работы штангового глубинного насоса станка - качалки нефти широко распространено использование динамограммы, представляющей собой зависимость нагрузки на полированный шток в функции его положения [2]. Динамометрирование позволяет контролировать работу штангового насоса и выявлять неисправности отдельных узлов подземного оборудования: негерметичность приемного и нагнетательного клапанов насоса, прихват плунжера, обрыв штанги, негерметичность насосно - компрессорных труб и др. Для динамометрирования необходимы датчик усилия на штоке СКН и датчик положения штока. Установка и эксплуатация этих датчиков достаточно трудоемка.

Ваттметрограмма представляет собой зависимость потребляемой приводом активной мощности от времени или от положения полированного штока при работе СКН. Если цель динамометрирования прежде всего контроль работы штангового насоса и отдельных узлов подземного оборудования: герметичность приемного и нагнетательного клапанов насоса, прихват плунжера, обрыв штанги, герметичность труб и др. [2], то с ис-

пользованием ваттметрограммы возникает возможность контролировать оборудование СКН в целом. При этом, получение ваттметрограммы не связано с применением датчиков для контроля усилий, например, как при динамометрировании скважины [3,4]. Для этого достаточен контроль только электрических величин: мгновенных значений тока и напряжения с вычислением активной мощности. Вид динамограммы и соответствующей ей ваттметрограммы показан на рис. 1.

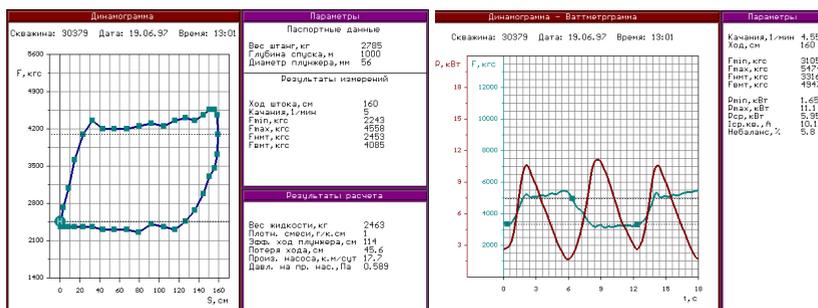


Рис. 1. Динамограмма СКН и наложение на нее соответствующей ей ваттметрограммы

Для SCADA-системы ваттметрограмма представляет собой последовательность замеров потребляемой приводом станка – качалки нефти активной мощности в течение цикла качания головки балансира СКН.

Эта последовательность замеров, получаемых с помощью датчиков шкафа управления СКН, передается по каналам связи на компьютеры SCADA-системы. Полученные данные могут предварительно обрабатываться, например, на предмет фильтрации от помех, затем можно рассчитать показатели, характеризующие работу СКН, и отобразить ваттметрограмму сведения о функционировании объекта управления на экране диспетчера. Такую обработку достаточно можно выполнить, в частности, в MS Excel, обладающем мощными средствами для математической обработки данных.

Для передачи данных из TRACE MODE следует организовать запрос реальных значений каналов узла разработанного проекта приложением MS Excel в соответствии с рекомендациями [5]. При этом в проекте Trace Mode создается новый узел с компонентом, например, «Write_to_Excel», затем в разделе

«Администратора ODBC» организовывается «Пользовательский DSN», настраивается строка подключения и т.д.

Для реализации непрерывных записей данных в Excel в группе «Каналы» создается компонент «Программа» с аргументом «выходной», целого типа данных, привязанный ко входному значению канала «Write_to_Excel». Программу можно оформить на языке ST.

Чтобы убедиться в работоспособности запроса следует проверить, что значения в ячейках книги MS Excel изменяются вместе с соответствующими реальными значениями используемого узла. После загрузки данных можно приступить к их обработке.

В качестве примера рассмотрим фильтрацию исходных данных с использованием методов скользящего среднего (иногда используют термин «осреднения») и медианной фильтрации. Оба метода сглаживания основаны на преобразовании входной последовательности n отсчетов

$$X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$$

в выходную последовательность той же длины

$$Y = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}\}.$$

Аналоговый фильтр, осуществляющий сглаживание по методу скользящего среднего, описывается выражением [6]:

$$Y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t) dt,$$

где $x(t)$ – исходный процесс; T – интервал времени усреднения (параметр настройки фильтра).

В дискретной форме алгоритм фильтрации по методу скользящего среднего имеет вид:

$$Y(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(t - iT_0),$$

где $n = T / T_0$ – число отсчетов функции $Y(t)$, по которому производится усреднение, T_0 – период опроса датчика.

Таким образом, очередной член выходной последовательности Y получается как среднее арифметическое нескольких соседних членов входной последовательности X . Для выполнения преобразования возьмем некоторое натуральное число k и рассмотрим подпоследовательность входных отсчетов длиной $2k+1$,

в которой средний член имеет индекс i . Тогда i -й член выходной последовательности будет вычисляться по формуле:

$$y_i = \frac{x_{i-k} + x_{i-k+1} + \dots + x_i + \dots + x_{i+k}}{2k + 1}.$$

Если члены входной последовательности с индексами меньшими 0 и большими $n-1$ будем считать равными x_0 и x_{n-1} соответственно, тогда выходная последовательность Y будет однозначно определена. Оптимальное значение k находится из условия минимизации погрешности фильтрации. Оно зависит от параметров помехи и периода опроса.

Метод скользящего среднего эффективен, когда выбросы редки и невелики по сравнению с полезным сигналом, в противном случае ошибка осреднения будет «размазана» по последовательности. Достоинством метода является простота его алгоритмической реализации.

При медианной фильтрации, предложенной Тьюки для фильтрации импульсных помех [7], очередной член выходной последовательности Y получается как медиана нескольких соседних членов входной последовательности X . Для определения медианы последовательности отсчетов нечетной длины $2k + 1$

$$A = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_k\},$$

где k – натуральное число.

Эту последовательность преобразуем в последовательность \mathbf{B} , расположив ее члены в порядке возрастания (неубывания). Тогда медианой последовательности \mathbf{A} будет называться число, занимающее среднее положение в последовательности \mathbf{B} , т.е. b_k :

$$b_k = m(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{2k}).$$

Число $2k + 1$ является шириной окна фильтрации. Каждый член выходной последовательности Y получается следующим образом:

$$y_i = m(x_{i-k}, x_{i-k+1}, \dots, x_i, \dots, x_{i+k}).$$

Как и ранее, принимаем: $x_i = x_0$, если $i < 0$, и $x_i = x_{n-1}$, если $i > n - 1$.

При использовании рекурсивного медианного фильтра первые k членов в окне фильтрации берутся из уже отфильтрованной последовательности, т.е.

$$y_i = m(y_{i-k}, \dots, y_{i-k+1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}).$$

Отличительным свойством рекурсивного медианного фильтра является то, что после однократного применения процедуры фильтрации получается инвариантная последовательность отсчетов, т.е. такая последовательность, которая не изменяется при последующей фильтрации медианным фильтром с той же шириной окна. Метод медианной фильтрации позволяет убирать выбросы большой амплитуды, но если эти выбросы будут частыми, то он бессилен, в этом случае и сама задача восстановления полезного сигнала теряет смысл.

На рис. 2 проиллюстрировано сглаживание исходных данных реальной ваттметрограммы СКН методами скользящего среднего и медианной фильтрации. Очевидно, что рассмотренные методы способны хорошо справляться с выбросами в входной последовательности, но при этом исчезают детали обрабатываемой ваттметрограммы.

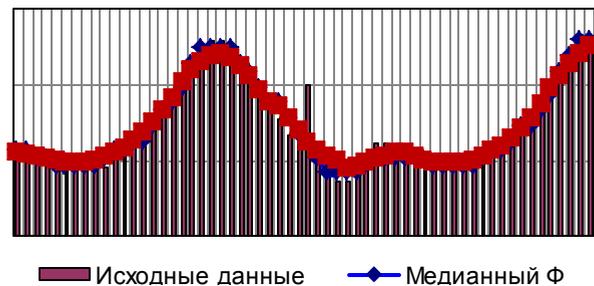


Рис. 2. Реальная ваттметрограмма СКН и результаты сглаживания методами скользящего среднего и медианной фильтрации

По сглаженной кривой ваттметрограммы, путем анализа значений минимумов и максимумов активной мощности, определяются:

– минимальное, максимальное и среднее за время цикла качания головки балансира значения потребляемой приводом СКН активной мощности

$$P_{\min} = \min \{P_i | 0 \leq i \leq T-1\},$$

$$P_{\min} = \min \{P_i | 0 \leq i \leq T-1\},$$

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} P_i ;$$

– небаланс СКН в процентах

$$D = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100 ,$$

где S_1 – площадь большого пика мощности в течение периода, S_2 – площадь меньшего пика мощности в течение периода.

Рассчитываемое значение небаланса характеризует разницу в потребляемой приводом СКН энергии при движении штока вверх и вниз.

Заранее известно, что последовательность отсчетов потребляемой приводом СКН мощности в установившемся режиме есть функция периодическая. Любую периодическую функцию, имеющую в пределах периода конечное число точек разрыва 1-го рода, можно представить в виде суммы гармонических функций кратных периодов. Гармоники с большей амплитудой оказывают большее влияние на течение процесса, следовательно, можно найти период последовательности отсчетов, который будет равен периоду гармоники с максимальной амплитудой.

Поскольку для дальнейших расчетов необходима только первая гармоника, период последовательности отсчетов X определяется путем построения моделей вида [8]:

$$y_{kt} = a_0 + a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{N}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{N}\right),$$

где N – длина последовательности отсчетов; $1 \leq k \leq N / 2$; $0 \leq t \leq N - 1$; $N / k = T$ – период регрессионной модели.

В результате вычислений коэффициентов a_0 , a_k и b_k может быть получен набор гармоник с периодами N , $N/2$, $N/3, \dots, 2$, при k от 1 до $N/2$ с амплитудами

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

и период $T = N / k$ рассматриваемой последовательности отсчетов X будет принят равным периоду k -ой гармоники с максимальной амплитудой.

В качестве периода исходной последовательности отсчетов (ваттметрограммы) берется значение T , при котором амплитуда AT максимальна. По данным [8] метод работает корректно, если

последовательность отсчетов X длины N содержит, по крайней мере, два периода, т.е. $N \geq 2T$. Откуда можно определить число качаний головки балансира в минуту:

$$N_{\text{кач}} = \frac{60}{T \times \text{step}},$$

где T – период последовательности отсчетов; step – шаг выборки отсчетов, с.

Результаты расчетов, выполненных в Excel, возвращаются в TRACE MODE путем выполнения запроса на чтение «Read_to_Excel» с использованием ранее созданного DSN.

Для отображения данных в корневой группе применяемого узла создается экран с аргументом двунаправленного типа «QUERY», связанный с входным значением канала, который вызывает запрос на чтение данных из электронной таблицы. На экране можно разместить графические элементы, базу данных и текст, как это показано на рис. 3.

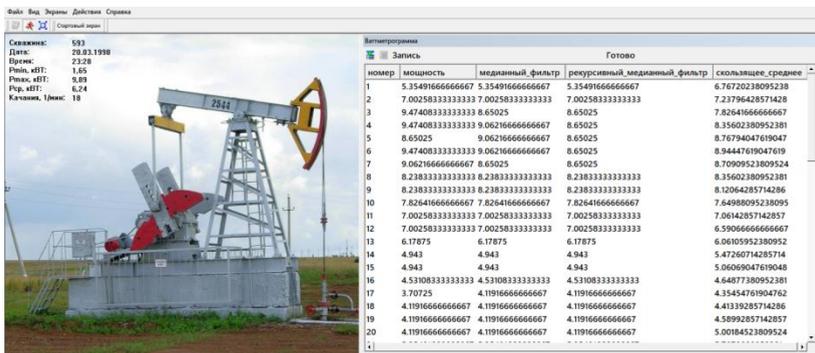


Рис. 3. Отображение данных на экране TRACE MODE

На экране отображаются исходные данные ваттметрограммы, результаты фильтрации с применением метода скользящего среднего и медианного фильтра, а также результаты расчета потребляемой мощности и скорости качания СКН. Рассмотренный пример показывает, насколько упрощает при работе в TRACE MODE программирование процедур фильтрации исходного потока данных и расчета показателей характеризующих работу СКН обращение к Excel.

Выводы

1. TRACE MODE – это отечественная высокотехнологичная SCADA-система среднего класса, одна из наиболее покупаемых в России для разработки крупных диспетчерских комплексов и программирования PC-контроллеров. Она имеет все необходимое для создания АСУ ТП мирового уровня.

2. Инструментальные средства TRACE MODE обеспечивают обмен данными с программными пакетами Excel, Access, Microsoft Visual Basic и др. Рассмотренный пример показывает, что это позволяет облегчить реализацию достаточно сложных алгоритмов обработки данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. SCADA TRACE MODE. <http://www.adastra.ru/>.
2. Белов И.Г. Исследование работы глубинных насосов динамографом. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. – 428 с.
3. Чаронов В.Я. Средства автоматизации технологических установок нефтегазодобывающих предприятий / В.Я. Чаронов, М.И. Альшуллер, В.С. Генин, А.Г. Иванов, и др.; под ред. Генина В.С. – Чебоксары: изд-во «Офисная полиграфия», 2002. – 272 с.
4. Генин В.С., Ерохин Е.Ю., Чаронов В.Я. Диагностика штангового глубинного насоса с помощью ваттметр-граммы. // Труды академии электротехнических наук Чувашской республики, № 1. 2000 г Чебоксары: ЧГУ. С. 42–48.
5. Trace Mode 6 & T-FACTORY. SOFTLOGIC SCADA/HMI MES EAM HRM. Интегрированная платформа для управления производством. Быстрый старт. Руководство пользователя. – М.: «AdAstra Research Group», Ltd, 2010. – 181 с.
6. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: Наука, 1987,- 318 с.
7. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. М.: Мир, 1981. – 160 с.
8. Отнес Р. К., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов: Основные методы. – М.: Мир, 1982. – 428 с.

Авторы:

Генин Валерий Семенович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах. Закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1976 году. Докторскую диссертацию по теме «Методы и техниче-

ские средства управления, контроля и испытаний электротехнического и технологического оборудования нефтегазодобывающих предприятий» защитил в 2008 году. E-mail: v.s.genin@mail.ru.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах. Закончила математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2000 году. Защитила кандидатскую диссертацию по теме «Методика формирования профессионально-математической компетентности студентов технических направлений на основе интеграции математики и информатики» в 2015 году. E-mail: oln2404@mail.ru.

Артыкаева Эльмира Мидхатовна, кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики. Закончила факультет энергетики и автоматизации ГБОУ ВО Альметьевского государственного нефтяного института в 2007 году. Защитила кандидатскую диссертацию по теме «Энергоресурсосберегающее электрооборудование нефтедобывающих установок с плунжерным погружным насосом» в 2012 году. E-mail: 85elmira@bk.ru.

Шарафутдинов Нияз Рефисович, студент 1 курса магистратуры факультета радиоэлектроники и автоматизации. E-mail: Niyazshar1999@mail.ru.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЛАМПА

Зайцев Ю.В., Мирошниченко А.Ю., Ковзик Н.С., ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Аннотация. Приводятся конструкции многофункциональных ламп, которые наряду с заданной освещенностью создают в производственном или жилом помещении повышенную концентрацию отрицательно заряженных ионов и атомов отдельных микроэлементов.

Ключевые слова: многофункциональные лампы, конструкции ламп, окружающая среда, ионы, атомы микроэлементов.

Электротехнической промышленностью выпускаются широкий ассортимент ламп различных конструкций для освещения и оформления интерьеров в производственных и жилых помещениях.

Разработка многофункциональных ламп началась еще в первой половине XX века – это лампы, которые наряду с созданием заданного светового потока создавали в помещении экологически благоприятную окружающую среду – по температуре и концентрации отрицательно заряженных ионов. Многочисленными исследованиями было получено, что повышенная концентрация отрицательно заряженных ионов в воздухе оказывает благотворное влияние на состояние здоровья человека. Одной из первых многофункциональных ламп можно назвать лампу Чижевского особенностью которой является то, что она создает в помещении повышенную концентрацию отрицательно заряженных частиц – аэронов (отрицательно заряженных ионов кислорода). Поскольку атомы кислорода имеют высокое значение электроотрицательности, при наличии в воздушной среде электронов происходит формирование отрицательно заряженных ионов.

Современные технологии позволяют регулировать температуру, влажность, чистоту воздуха, например, с помощью вентиляции, кондиционеров, специальных фильтров. Но важное значение имеет и состав воздушной среды – в частности наличие отрицательно заряженных частиц – аэронов. Изучению этого природного фактора посвятил свою жизнь русский ученый Чижевский А.Л. Именно благодаря ему, в нашу жизнь вошли приборы для восстановления в воздухе помещений природных электрических зарядов – ионизаторы воздуха, которые известны под названием люстр Чижевского.

В лабораториях Мордовского государственного университета им. Огарёва Н.П. проведена разработка новых типов многофункциональных ламп с эффектом создания повышенной концентрации отрицательно заряженных ионов. В результате этих работ, совместно с научно-производственным предприятием «Альфаприбор», создан ряд многофункциональных ламп – ионизаторов воздуха под общим названием «Аэроион-25». Отметим, что разработаны приборы для самых разнообразных применений, от мощных промышленных ламп – ионизаторов воздуха для помещений площадью до 1500-2000 м², до переносных настольных вариантов. Причём наряду с лечебно-профилактическими целями, многофункциональные лампы- ионизаторы воздуха, обладают еще целым рядом полезных свойств: уменьшают токсичность воздуха и очищают его от пыли и микробов.

Исследованиями сотрудников с лаборатории медицинской экологии, под руководством проф. Скипетрова В.П. установлено, что под действием аэроионов улучшается состояние больных с заболеваниями сердечно-сосудистой системы (гипертоническая и гипотоническая болезни, стенокардия), системы дыхания (бронхиальная астма и хронический бронхит) и нервной системы (бессонница, мигрень). Так исследование системы гемостаза у доноров-добровольцев показало, что пребывание в течение часа в помещении с избытком аэроионов замедляет на 20-25 % свертывание крови и эффективно стимулирует ее фибринолитическую активность (на 50 %-200 %), т.е. отрицательные аэроионы кислорода оказывают ярко выраженное противотромботическое действие, предотвращает развитие тромбоземоррагического синдрома (ДВС-синдрома).

По своему основному функциональному назначению источники света, создающие необходимую освещенность в производственных и жилых помещениях. Отметим, что в последние годы отечественными и зарубежными фирмами ведутся разработки многофункциональных ламп, которые наряду с заданной освещенностью создают в помещении более благоприятную для человека окружающую среду – в частности отдельные конструкции таких ламп создают в производственном или жилом помещении повышенную концентрацию отрицательно заряженных ионов и атомов отдельных микроэлементов.

Одной из разновидностью таких многофункциональных ламп являются так называемые соляные лампы. Конструкция соляной лампы представлена на рис. 1.

Выпускающиеся соляные лампы, представляющие собой соляной кристалл, во внутренней полости которого расположена лампа накаливания, создающая световой поток и способствующая сублимации в окружающую среду микроэлементов и отрицательно заряженных ионов. Существенным недостатком выпускаемых конструкций соляных ламп является то, что сублимация микроэлементов идет с поверхности кристалла, в основном на начальном этапе эксплуатации лампы, а затем происходит истощение поверхностной концентрации микроэлементов и эффективность функционирования лампы снижается.

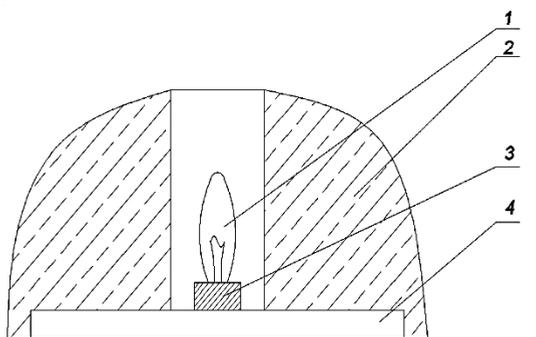


Рис. 1. Соляная лампа: 1 – лампа накаливания; 2 – оболочка (соляной кристалл); 3 – цоколь лампы; 4 – основание лампы

Авторами разработана новая конструкция соляной лампы, в которой в качестве источника, сублимирующего ионы и микроэлементы в окружающую среду используется крупнодисперсная морская соль, помещаемая между корпусом лампы 1 и кварцевой трубкой 3, в которой расположена лампа накаливания 2 (рис. 2). Совокупная поверхность кристаллов морской соли в 5–7 раз превышает поверхность соляного кристалла, представленного на рис. 1. Тем самым значительно повышается интенсивность сублимации микроэлементов в окружающую среду с поверхности кристаллов морской соли. Основные элементы конструкции соляной лампы приведены на рис. 2.

Итак, в разработанной конструкции лампы ионы и атомы микроэлементов под действием светового излу-

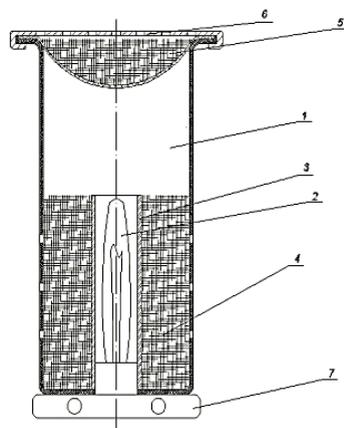


Рис. 2. Соляная лампа.
 1 – корпус лампы;
 2 – лампа накаливания;
 3 – кварцевая трубка;
 4 – кристаллы морской соли;
 5 – сеточный контейнер;
 6 – крышка; 7 – основание лампы

ния сублимируют с поверхности кристаллов в окружающую среду. Лампа накаливания 2 помещается в кварцевую трубку 3, чтобы исключить взаимодействие нагретой поверхности лампы с кристаллами морской соли, располагаемыми между кварцевой трубкой и стеклянным корпусом лампы.

Для усиления эффекта генерации лампой отрицательно заряженных ионов и микроэлементов в верхней части лампы дополнительно установлен сеточный контейнер 5, заполненный кристаллами морской соли. Восходящие от лампы нагретые воздушные потоки, проходя через кристаллы соли сеточного контейнера, способствуют дополнительной сублимации ионов и микроэлементов в окружающую среду.

Разработанная конструкция позволяет проводить замену кристаллов соли как в основной конструкции лампы, так и в дополнительном контейнере, тем самым эффективное использование лампы может быть продлено заменой кристаллов соли как в основной конструкции лампы, так и в дополнительном контейнере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сублимация (Физика). Изд. Книга по требованию. М.: 2012.
2. *Шашлов А. Б* Основы светотехники. Изд. Логос. М.: 2011.
3. *Чижевский А. Л.* Аэроионификация в народном хозяйстве. - М.: Госпланиздат, 1960 (2-е изд. - Стройиздат, 1989).

Авторы:

Зайцев Юлий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: zzz6452@yandex.ru.

Мирошниченко Антон Юрьевич, канд. физ.-мат наук, доцент кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: anmir53@mail.ru.

Ковзик Никита Сергеевич, магистрант кафедры «Физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК)», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» E-mail: kovzik.nikita@gmail.com.

НАДЕЖНОСТЬ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ

Лыков Ю.Ф., Самарский Государственный Технический университет, г. Самара, Россия

***Аннотация.** Рассматривается возможность повышения бесперебойности питания электроприемников собственных нужд пониженных подстанций напряжением 110-220/6-35 кВ. Показано, что рекомендуемая в настоящее время руководящими документами система заземления TN-C-S с глухозаземленной нейтралью и занулением уступает системе IT по степени надежности электроснабжения потребителей собственных нужд. Переход на систему IT приведет также к снижению вероятности возникновения пожаров, и электроtraм вызванных однофазными замыканиями в электрических сетях собственных нужд напряжением ниже 1000 В.*

***Ключевые слова:** система заземления сети, нейтраль, ток однофазного замыкания, бесперебойность, пожар, прямое и косвенное прикосновения.*

В электрических сетях напряжением ниже 1000 В России и многих зарубежных стран, где приняты стандарты МЭК, различают три системы заземления:

а) TN, которая существует в двух вариантах:

TNC – нейтраль заземлена, открытые проводящие части (ОПЧ) занулены и заземлены с помощью совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего проводника PEN (4-х проводная схема);

TNS – нейтраль заземлена, ОПЧ занулены и заземлены с помощью нулевого защитного проводника PE (5-ти проводная схема);

б) TT – нейтраль заземлена, ОПЧ заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от заземленной нейтрали источника;

в) IT – нейтраль изолирована от земли, ОПЧ заземлены.

Свойства этих систем в нормальном режиме, при трех и двухфазных КЗ одинаковы. Но в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) (до 80 % всех замыканий) они значительно отличаются друг от друга по степени пожарной опасности, бесперебойности электроснабжения потребителей, по условиям и

способам обеспечения электробезопасности, требованиям к заземляющим устройствам, простоте и удобству проектирования и эксплуатации.

Характеристика сетей TNC, TNS:

- нейтраль источника глухо заземлена;
- ОПЧ занулены и заземлены;
- ток однофазного КЗ на ОПЧ велик (сотни Ампер), высока опасность пожара;
- автоматическое отключение обеспечивается максимально-токовой защитой (МТЗ), для чего ток однофазного КЗ должен быть достаточно большим;
- напряжение прямого прикосновения равно фазному напряжению;

Преимущества:

- один вид защиты (МТЗ) от одно-, двух- и трехфазных КЗ;
- экономия за счет возможного отказа от УЗО;
- не требуется постоянный эксплуатационный надзор.

Недостатки:

- самая высокая среди сетей TN, TT, IT опасность возникновения пожара при однофазном КЗ на ОПЧ;
- низкая степень бесперебойности электроснабжения: первое же однофазное замыкание на ОПЧ вызывает отключение питания.

В соответствии с нормативными документами [1; 2] именно системы заземления TN-C-S должны использоваться для потребителей собственных нужд подстанций.

Характеристика сети IT:

- нейтраль источника изолирована от земли или присоединена к ней через большое сопротивление;
- ОПЧ соединены между собой и заземлены;
- первое однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) или на ОПЧ не является аварией, ток замыкания редко превышает 1 А;
- косвенное прикосновение безопасно, быстрое отключение при первом ОЗЗ не требуется;
- напряжение прямого прикосновения в исправной сети меньше фазного; прямое прикосновение может быть опасно при

большой емкости сети и/или при работе сети с заземленной фазой;

- первое замыкание сигнализируется с помощью устройства контроля изоляции, включенного между нейтралью и землей;

- при двойном замыкании установка автоматически отключается с помощью МТЗ;

- проверка надежности отключения при двойном замыкании осуществляется путем расчетов или замеров.

Преимущества:

- первое ОЗЗ не вызывает отключения питания;

- при первом ОЗЗ отсутствуют опасность пожара и косвенного прикосновения;

- в исправной сети ИТ напряжение прямого прикосновения значительно ниже, чем в сети TN.

Недостатки:

- необходим эксплуатационный надзор;

- эксплуатационный персонал должен иметь достаточную квалификацию, чтобы отыскивать место первого замыкания и достаточный уровень производственной дисциплины, чтобы не допускать длительной работы сети с заземленной фазой или нейтралью; Для ускорения поиска места первого замыкания рекомендуется установка УЗО высокой чувствительности с действием на сигнал;

- необходим высокий уровень изоляции сети относительно земли;

- прямое прикосновение в поврежденной (с заземленной фазой), но работающей сети более опасно, чем в сетях TT и TN, т.к. напряжение прикосновения равно линейному;

- повышенная вероятность перенапряжений.

На упрощенной схеме сети ИТ (рис. 1) показаны:

E_a, E_b, E_c – фазные напряжения относительно нейтрали;

U_a, U_b, U_c – фазные напряжения относительно земли;

U_n – напряжение нейтрали относительно земли;

I_a, I_b, I_c, I_n – токи, протекающие через емкости провод-земля.

Нагрузка отключена, провод фазы С замкнут на землю.

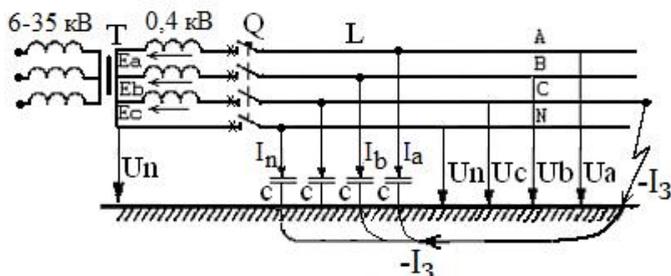


Рис. 1. Первое замыкание в сети IT: принципиальная схема

Формула расчета тока получается из векторной диаграммы (рис. 2):

$$I_3 = I_a \cdot \cos 30^\circ + I_b \cdot \cos 30^\circ + I_n = 2 \frac{U_{\text{л}}}{X_C} \cdot \cos 30^\circ + \frac{U_{\phi}}{X_C} =$$

$$= 2 \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{X_C} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{U_{\phi}}{X_C} = 3 \frac{U_{\phi}}{X_C} + \frac{U_{\phi}}{X_C} = 4 \frac{U_{\phi}}{X_C} = \frac{U_{\phi}}{(X_C/4)};$$

где X_C – емкостное сопротивление одной фазы сети по отношению к земле.

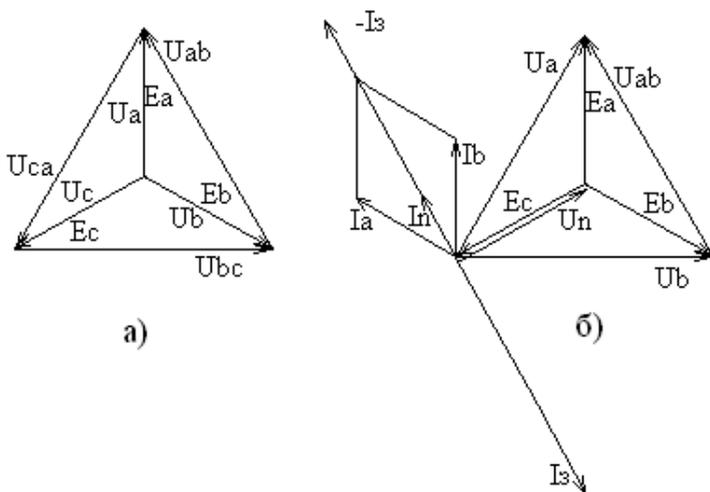


Рис. 2. Векторные диаграммы:
а – исправная сеть, б – первое замыкание в сети

Последнее выражение соответствует расчетной схеме рис. 3, а, в которой эквивалентное емкостное сопротивление $X_{c\varepsilon} = X_c / 4$ включено между нейтралью и землей. Если нейтральный провод по сети не распределен (3-х проводная сеть), то $X_{c\varepsilon} = X_c / 3$.

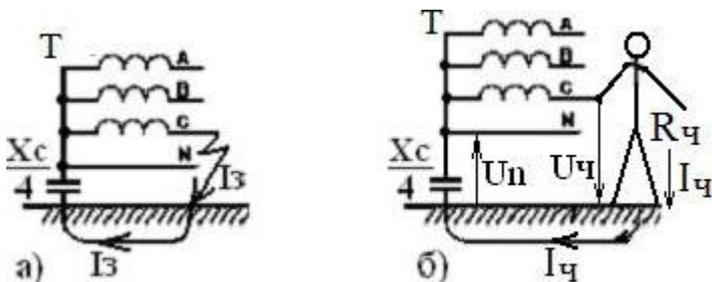


Рис. 3. Расчетные схемы: а – первого замыкания, б – прямого прикосновения в исправной сети

Если в отсутствие первого замыкания человек касается токоведущей части, находящейся под напряжением (рис. 3, б), то ток $I_ч$ будет протекать через тело человека, (сопротивление $R_ч$) и эквивалентное сопротивление изоляции сети $X_c/4$, включенные последовательно:

$$I_ч = \frac{U_φ}{Z} = \frac{U_φ}{\sqrt{(X_c / 4)^2 + R_ч^2}}.$$

Напряжение прямого прикосновения $U_ч$ – меньше фазного $U_φ$:

$$U_ч = I_ч \cdot R_ч = \frac{U_φ \cdot R_ч}{\sqrt{(X_c / 4)^2 + R_ч^2}} = \frac{U_φ}{\sqrt{\left(\frac{X_c / 4}{R_ч}\right)^2 + 1}}.$$

Пример.

Определить величину тока ОЗЗ и напряжений прямого и косвенного прикосновений в сети ТГ с распределенной нейтралью, $U_н = 380$ В. Сеть выполнена кабелями, имеющими удельную емкость одной жилы относительно заземленной оболочки $C_0 = 0,35 \cdot 10^{-6}$ Ф/км, $L = 1$ км, $R_{з\text{аземл}} = 30$ Ом, $R_ч = 2500$ Ом.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C_0 \cdot L} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 0,35 \cdot 1} = 9,1 \text{ кОм},$$

Ток ОЗЗ: $I_3 = 4 \cdot U_\phi / X_C = 4 \cdot 220 / 9,1 = 97 \text{ мА}$.

Напряжение прямого прикосновения в исправной сети:

$$Z = \sqrt{R_\phi^2 + (X_C / 4)^2} = \sqrt{2,5^2 + (9,1 / 4)^2} = 3,38 \text{ кОм},$$

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{230}{3,38 \cdot 10^3} = 0,068 \text{ А} = 68 \text{ мА},$$

$$U_\phi = I_\phi \cdot R_\phi = 0,068 \cdot 2500 = 170 \text{ В}.$$

Напряжение косвенного прикосновения при первом ОЗЗ:

$$U_{\text{косв}} = I_3 \cdot R_{\text{заземл}} = 0,097 \cdot 30 = 2,91 \text{ В}.$$

Ток ОЗЗ не представляет никакой опасности, напряжение прямого прикосновения меньше фазного, напряжение косвенного прикосновения при первом замыкании безопасно.

Вывод

При выборе системы заземления сети 0,4 кВ для электропитания потребителей собственных нужд подстанций предпочтение следует отдавать системе заземления IT, превосходящей систему TN-C-S по бесперебойности питания, по электро- и пожарной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПАО «ФСК ЕС», СТО 56947007-29.240.40.263-2018. Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения. Стандарт организации. П. 8.[Текст]. Дата введения: 18.12.2018.
2. Стандарт организации НП «ИНВЭЛ», СТО 70238424.29.240.10.013-2009. Системы собственных нужд подстанций. Условия создания. Нормы и требования.П.6.2.6. [Текст]. Дата введения 2010-01-11.

Авторы:

Лыков Юрий Федорович, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Самарского Государственного технического университета. Окончил Электротехнический факультет Куйбышевского Политехнического института в 1965 году. Ученую степень кандидата технических наук получил в 1973 году по теме «Оптимизация режимов работы высоковольтных синхронных электродвигателей».

НЕТРАДИЦИОННЫЙ СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ БУМАЖНО-ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ПРОДУКЦИИ

Пазушкина О.В., Абайдуллина Ю.Р., Абрамов А.В., Ул-ГТУ, г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** В данной статье выполнена оценка возможности переработки целлюлозно-бумажной продукции с применением оборудования ТЭЦ. Основой предложенных авторами решений является использование технологического оборудования ТЭЦ для удаления остаточной влаги из целлюлозно-бумажной продукции.*

***Ключевые слова:** ТЭЦ, целлюлозно-бумажная продукция, энергетическая эффективность.*

Продолжающиеся загрязнения природной среды твёрдыми отходами производства и потребления в последнее время остаются критической экологической проблемой. Поэтому возникает необходимость внедрения технологий по переработке мусора, которые позволили бы уменьшить риски уничтожения природы. Особенностью отечественной переработки промышленно-бытового сырья является усовершенствование существующих способов переработки для производства вторичного сырья и готовых изделий, что позволит уменьшить количество полигонов, сэкономить природные ресурсы, снизить выброс вредных веществ и эффективно использовать энергетический и тепловой функционал ТЭЦ.

На данный момент в РФ реализуется «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». А так же действуют Постановление Правительства Российской Федерации от 28 февраля 2017 года № 240 «Об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» и Распоряжение Правительства РФ от 28.02.2017 № 355-р «Перечень субъектов Российской Федерации, в которых предусматривается строительство (реконструкция, модернизация) генерирующих объектов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления» [1, 2, 3].

Во время переработки с макулатурой делают следующее: удаляют клей, соединяющий волокна целлюлозы в одно целое, очищают от загрязнений, превращают в чистую массу, пригодную для производства бумаги и картона или любого другого применения (облагораживают).

Оборудование первой необходимости для основных этапов переработки бумажно-целлюлозной продукции представлено в табл. 1 [5].

Таблица 1

Специализированное оборудование

Название и модель	Описание	Производительность
Измельчитель макулатуры (дробилка) SX-100	Измельчает макулатуру, солому и другие материалы, подготавливая их к дальнейшей обработке	1 т/ч
Дробилка AMD-2000	Дробит бумагу на куски небольшого размера, чтобы облегчить работу гидроразбивателя	50 кг/ч
Гидроразбиватель типа ГРВ-02	Превращает макулатуру в макулатурную массу (пульпу)	10-30 т/сутки
Сортировка ZNS	Сортирует пульпу на размолотую массу, неразбитую бумагу и загрязнения	20-300 м ³ /сутки (зависит от модели)

Авторами разработано устройство для удаления из бумаги остаточной влаги, представленное на рис. 1.

Особенностью предоставленного решения является использование греющего агента в установке, размещенной на городских ТЭЦ или в непосредственной близости от них.

Переработанная влажная макулатура поступает в полый прямоугольный тоннель. Внутри него расположена зона удаления из переработанной макулатуры остаточной влаги. В качестве греющего агента используются деаэрированная вода, отбираемая из деаэратора высокого давления с необходимыми параметрами.

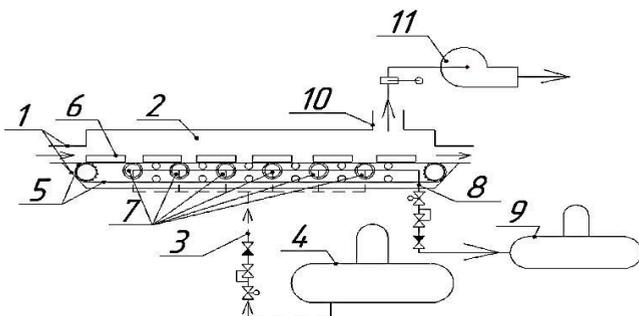


Рис. 1. Устройство для удаления остаточной влаги:
 1 – прямоугольный тоннель; 2 – зона удаления остаточной влаги;
 3 – трубопровод деаэрированной воды, используемой в качестве
 нагревательной среды; 4 – деаэратор высокого давления;
 5 – ленточный конвейер; 6 – бугорчатые прокладки;
 7 – трубопровод конвейера; 8 – трубопровод исходной воды
 деаэратора низкого давления; 9 – деаэратор низкого давления;
 10 – патрубок отвода парогазовой смеси; 11 – дымосос

Предложенное устройство позволяет повысить эффективность работы установки за счет снижения затрат на электроэнергию в качестве теплоисточника.

Для оценки эффективности предложенного решения был проведен сравнительный анализ установок с применением электрической и тепловой энергии результат, которого представлен в табл. 2, расчеты были выполнены на 1 тонну перерабатываемого сырья.

Результаты расчета эксплуатационных затрат на переработку 1 тонны макулатуры доказывают эффективность использования тепловой энергии в качестве греющего агента [4].

Выводы

Преимуществами предлагаемого решения, представленного в статье, являются:

- низкая стоимость тепловой энергии;
- высокий коэффициент теплопередачи греющей среды;
- увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет использования тепловой энергии;
- наличие других источников греющей среды для установки;

– увеличение скорости сушки макулатуры за счет возможности сооружения установок с большой единичной мощностью.

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа установок с применением электрической и тепловой энергии

Наименование величины	С тепловой энергией	С электрической энергией
Количество перерабатываемой макулатуры, т/ч	1	
Затраты электроэнергии на сушку сырья, кВт/ч	-	135
Стоимость электроэнергии, руб/кВт	-	6,5
Затраты тепловой энергии на сушку сырья, Гкал/ч	0,116	-
Стоимость тепловой энергии, руб/Гкал	2095	-
Затраты энергоносителя на сушку сырья, руб/т	243,02	877,5
Экономия руб/т	634,48	

Произведен сравнительный анализ устройств с использованием электрической и тепловой энергии. Переход на использование тепловой энергии в качестве греющей среды позволяет экономить 635 рублей на тонну перерабатываемой бумаги и картона.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года».

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 февраля 2017 года № 240 «Об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

3. Распоряжение Правительства РФ от 28.02.2017 № 355-р «Перечень субъектов Российской Федерации, в которых предусматривается строительство (реконструкция, модернизация) генерирующих объек-

тов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления».

4. Пазушкина О.В., Абайдуллина Ю.Р., Абрамов А.В. Устройство удаления остаточной влаги из бумажной продукции / Молодые исследователи – регионам: материалы Международной научной конференции (Вологда, 20–21 апреля 2021 г.): в 3 т. – Вологда ВоГУ, 2021. – Т. 1. С. 316-317.

5. Покупка и продажа оборудования для бизнеса. Компания «Leizhan»: официальный сайт URL: <https://www.pulppapermachine.com/products/screeningequipment/index.html> (дата обращения: 08.10.2021).

Авторы:

Пазушкина Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шаранова», УлГТУ. E-mail: o.pazushkina@yandex.ru.

Абайдуллина Юлия Рамилевна, студент-магистр 2 курса кафедры «ТГВ им. В.И. Шаранова», УлГТУ. E-mail: a.aliya999@mail.ru.

Абрамов Алексей Васильевич, аспирант 2 курса кафедры «ТГВ им. В.И. Шаранова», УлГТУ. E-mail: aleksei.abramov.96@mail.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕСТНО УСТАНОВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ И НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Малькова Я.Ю., Уфа Р.А., Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

***Аннотация.** Ввиду увеличения количества и установленной мощности объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии все большую актуальность приобретает проблема непостоянства выработки электроэнергии ими. Одним из решений является совместная установка возобновляемой генерации и накопителя энергии. Приведем решение задачи определения оптимальных параметров объекта возобновляемой генерации и накопителя энергии на примере 15-узловой IEEE схемы.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, непостоянство выработки, системы накопления энергии, оптимальное место и мощность, суточный график нагрузки и генерации, оптимальная емкость.*

В настоящее время в мировой электроэнергетике доля электроэнергии, вырабатываемой объектами генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), составляет немногим меньше 30 % [1].

Одним из основных недостатков возобновляемой энергии, особенно с учетом ее значительной доли в покрытии текущего спроса на электроэнергию, является непостоянство выработки электроэнергии, которое, в свою очередь, определяется суточными и сезонными изменениями погодных условий.

Кроме того, имеет место несоответствие периодов времени генерации электроэнергии и повышенного спроса на нее со стороны конечного потребителя. Например, для солнечных электростанций, выработка электроэнергии которых определяется, в частности, степенью инсоляции, характерной для текущего момента времени, максимум генерации наблюдается в дневные часы, в то время как пик спроса на электроэнергию, как правило, отмечается в вечерние часы.

В настоящее время имеют практическое применение два возможных решения обозначенной проблемы несоответствия периодов времени избыточной генерации объектами ВИЭ и пиков потребления электроэнергии, а именно: во-первых, покрытие основного спроса генерацией ВИЭ, а пиковых нагрузок – посредством подключения газотурбинных установок необходимой мощности; во-вторых, требуемая мощность ВИЭ рассчитывается из условия покрытия максимального спроса за сутки, при этом в часы избыточной генерации осуществляется накопление энергии в системах накопления энергии (СНЭ), а в часы недостаточной генерации имеет место покрытие текущего спроса за счет выдачи накопленной энергии СНЭ.

В контексте актуальной экологической повестки второй вариант является более предпочтительным, он и подлежит рассмотрению далее.

В качестве исследуемой схемы выбрана радиальная сеть 15-узловой IEEE схемы [2].

На первом этапе решения поставленной задачи определения оптимальных параметров совместно устанавливаемых объекта ВИЭ и СНЭ рассмотрим отдельно оптимальную установку объекта возобновляемой генерации.

Критерием оптимальности установки является величина суммарных потерь мощности, соответственно, конфигурация схемы и параметры внедряемого объекта, при которых величина суммарных потерь мощности минимальна, являются оптимальными.

Помимо критерия оптимальности задаем ограничительные условия на отсутствие обратного перетока мощности на головном участке и соответствие уровней напряжения всех узлов исследуемой схемы (0,95...1,05) о.е.

Допустимый диапазон установленной мощности объекта ВИЭ определяем индивидуально для каждого узла. Так, верхняя граница диапазона соответствует суммарной мощности нагрузки, расположенной за узлом установки объекта.

Применяя разработанный авторами алгоритм определения оптимальной мощности и места подключения к сети объекта ВИЭ [3], основанный на итерационном методе расчета перетоков и потерь мощности, в качестве оптимального узла установки объекта возобновляемой генерации выбран узел 3 исследуемой схемы, мощность объекта составляет 718 кВт.

На втором шаге решения задачи необходимо рассмотреть суточный график суммарной нагрузки и генерации выбранного объекта ВИЭ. В первом приближении график суммарной нагрузки построим в соответствии с типовыми графиками обобщенной нагрузки (рис. 1).

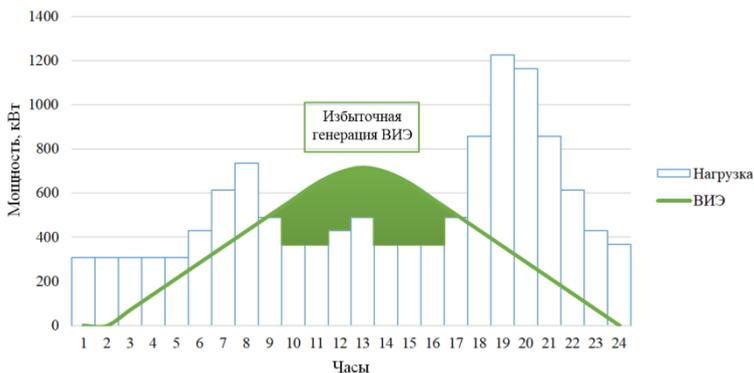


Рис. 1. Суточный график суммарной нагрузки и генерации ВИЭ для исследуемой схемы

Для каждого расчетного часа требуемая мощность СНЭ определяется как сумма текущей суммарной нагрузки и суммарных потерь мощности за вычетом текущей выработки электроэнергии объектом ВИЭ, согласно формуле (1):

$$P_{\text{снэ}_k} = \sum_{i=1}^{15} P_{\text{н}_i} + \sum_{j=1}^{14} dP_j - P_{\text{виэ}_k}, \quad (1)$$

где $P_{\text{снэ}_k}$ – требуемая мощность СНЭ для k -го расчетного часа, $k = 1 \dots 24$; $\sum_{i=1}^{15} P_{\text{н}_i}$ – текущая суммарная мощность нагрузки узлов схемы с 1-го по 15-ый, соответствующая k -ому расчетному часу; $\sum_{j=1}^{14} dP_j$ – суммарные потери мощности на линиях связи с 1-ой по 14-ую, соответствующие k -ому расчетному часу; $P_{\text{виэ}_k}$ – текущая мощность, вырабатываемая объектом ВИЭ, соответствующая k -ому расчетному часу.

В таком случае, если требуемая мощность СНЭ получается со знаком «+», то текущая суммарная нагрузка превышает генерацию объекта ВИЭ и СНЭ необходимо выдать данную мощность нагрузке. Если же мощность СНЭ получается со знаком «-», то ВИЭ генерирует избыточную мощность, превышающую текущее потребление, таким образом, СНЭ необходимо накопить данную мощность с последующей ее выдачей в часы дефицита генерации.

Для определения требуемой мощности СНЭ необходимо знать суммарные потери мощности для каждого расчетного часа, для чего выполним моделирование исследуемой схемы в программном комплексе MATLAB/Simulink и рассчитаем данную величину встроенной функцией LoadFlow, которая, в свою очередь, предназначена для расчета параметров установившегося режима [4].

Приведем пояснение расчета требуемой мощности СНЭ на примере расчетного часа с наибольшей избыточной генерацией ВИЭ и наибольшим дефицитом мощности.

Так, в 14 часов суммарная нагрузка составляет 30% от номинального значения или 368 кВт, при этом суммарные потери активной мощности 6 кВт и генерация объекта ВИЭ соответствует 97% (дневной пик генерации) от номинального значения или 696 кВт, согласно формуле (2):

$$P_{\text{снэ}_{14}} = \sum_{i=1}^{15} P_{\text{н}_i} + \sum_{j=1}^{14} dP_j - P_{\text{виэ}_{14}} = 368 + 6 - 696 = -322 \text{ кВт.} \quad (2)$$

Таким образом, в данный расчетный час СНЭ необходимо накопить излишне генерируемую мощность ВИЭ в размере 322 кВт.

В 20 часов суммарная нагрузка составляет 95 % (вечерний пик потребления) от номинального значения или 1165 кВт, при этом суммарные потери активной мощности 44 кВт и генерация объекта ВИЭ соответствует 40 % от номинального значения или 287 кВт, согласно формуле (3):

$$P_{\text{снэ}_{20}} = \sum_{i=1}^{15} P_{\text{н}_i} + \sum_{j=1}^{14} dP_j - P_{\text{виэ}_{20}} = 1165 + 44 - 287 = 922 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Таким образом, в данный расчетный час СНЭ необходимо компенсировать дефицит генерации и выдать нагрузке мощность в размере 922 кВт.

Согласно анализу результатов расчета суточного графика суммарной нагрузки и генерации (рис. 1), избыточная генерация выбранным объектом ВИЭ имеет место с 9 до 18 часов и суммарно составляет 1764 кВт, т.е. данную мощность СНЭ накапливает в течение суток. Введя коэффициент запаса, равный 1,25, определим емкость совместно устанавливаемой с выбранным объектом ВИЭ СНЭ в размере 2205 кВт ч.

Выводы

Таким образом, в результате проведенной работы выявлена проблема несоответствия пиков выработки электроэнергии объектами ВИЭ и ее потребления нагрузкой. Представлено решение данной проблемы на примере типовой 15-узловой IEEE схемы посредством совместной оптимальной установки объекта возобновляемой генерации и СНЭ. Оценена оптимальная емкость

накопителя энергии по типовым суточным графикам обобщенной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии: статистика. – Enerdata, 2021. [Электронный ресурс]: <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html> (дата обращения: 31.10.2021).

2. *Baran M., Wu F.* Optimal sizing of capacitors placed on a radial-distribution system // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – V. 4, Iss. 1. – P. 735-743.

3. *Ufa R.A., Malkova Y.Y., Gusev A.L., Ruban N.Y., Vasilev A.S.* Algorithm for optimal pairing of res and hydrogen energy storage systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46, Iss. 68. – P. 33659-33669.

4. *Srikanth P., Rajendra O., Yesuraj A., Tilak M., Raja K.* Load Flow Analysis of IEEE 14 Bus System Using MATLAB // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – V. 2, Iss. 5. – P. 149-155.

Авторы:

Малькова Яна Юрьевна, магистрант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета. В 2021 году получила диплом с отличием о присуждении степени бакалавра по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета). E-mail: yamalkova96@gmail.com.

Уфа Руслан Александрович, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета. В 2012 году получил диплом с отличием о присуждении степени магистра техники и технологии по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета). В 2017 году получил ученую степень кандидата технических наук по направлению 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы по теме «Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени вставок постоянного тока в электроэнергетических системах». E-mail: hесn@tpu.ru.

ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Степушин Д.В., Пазушкина О.В., Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** Возобновляемая энергетика в настоящее время пребывает в состоянии бурного развития. Тенденции к ее росту наблюдаются во всем мире, в том числе и в России. Наша страна обладает огромным ветровым потенциалом, особенно в северной ее части. Однако здесь присутствует ряд уникальных для нашей страны проблем, связанных с климатическими условиями.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, ветрогенератор, ветроэнергетическая установка, климат, обледенение, проблема.*

Российская Федерация намного позднее остальных развитых стран обратила свое внимание на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Из этого вытекает ряд проблем, тормозящий развитие ВИЭ в нашей стране. Отсутствие собственных технологий, нехватка специалистов в нашей стране, устаревшие энергосети. Правительство нашей страны начало оказывать сильную поддержку компаниям, введя в силу договор продажи мощностей ВИЭ, однако это справедливо лишь для центральной части России.

Перспективы ВИЭ в северных регионах России.

Арктическая часть нашей страны обладает рядом преимуществ, относительно центральной части, в плане использования возобновляемых источников энергии. Ключевыми здесь являются два фактора.

Первый фактор – технический. Потенциал по ветру в этой области действительно большой. Для наглядного примера на рис. 1 изображена карта ветров, смоделированная с помощью программного обеспечения WAsP на высоте 100 метров [1]. Опираясь на нее, можно сказать, что во многих северных районах средняя скорость ветра достигает 8-9 м/с. В большинстве случаев такая скорость ветра достигается за счет отсутствия существенных перепадов высот, расположением на побережье океана и отсутствием какой-либо существенной и высокой растительности. Следствием всего этого так же является низкая длина шероховатости поверхности и отсутствие сильной турбулентности. На рис. 2 представлена карта длины шероховатости

поверхности, смоделированная с помощью программного обеспечения WAsP [1]. На ней можно выделить существенно меньшую длину шероховатости поверхности в северных районах, относительно центральной части России. Рассматривая потенциал ветра, так же необходимо обратить внимание на плотность воздуха. Этот параметр напрямую влияет на кинетическую энергию ветра, следственно и на выработку ветрогенераторов. В формуле ниже представлена зависимость кинетической энергии ветра $E_{\text{ветра}}$, Дж:

$$E_{\text{ветра}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; S – сечение, через которое проходит поток воздуха, м²; v – скорость потока воздуха, м/с.

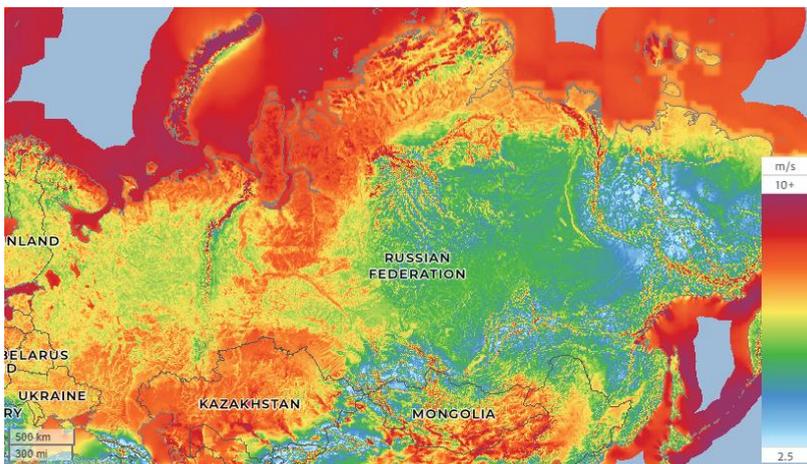


Рис. 1. Карта ветров WAsP на высоте 100 метров

Плотность воздуха зависит от давления, температуры, влажности воздуха и высоты. Основное влияние в контексте рассматриваемой темы оказывает температура. В среднем в северных широтах России абсолютный минимум доходит до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, абсолютный максимум редко достигает значение в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосферное давление в рассматриваемых областях ниже на 3-5 % относительно центральной части России, однако в совокупности этих двух факторов, средняя плотность воздуха в север-

ных регионах выше на 7-10 %. Такие выводы получены при анализе данных метеостанций и спутниковых наблюдений ERA5, MERRA2 в программном комплексе WindPRO [2].



Рис. 2. Карта шероховатости поверхности WAsP

Второй фактор – экономический. Основное влияние оказывает энергосистема России. На рис. 3 изображена карта распределения локальных изолированных систем энергоснабжения [3].



Рис. 3. Карта распределения локальных изолированных систем энергоснабжения

Опираясь на эту карту можно сделать вывод, что практически все северные районы имеют либо автономное энергоснабжение, либо неэлектрифицированы. В большинстве случаев автономное энергоснабжение представляет собой дизельную генерацию.

Дизельная генерация является очень дорогим способом получения электроэнергии. В среднем стоимость 1 кВт*час для изолированных территорий обходится в 40-55 рублей. Однако есть районы, в которых стоимость выше в несколько раз, ввиду логистики и доставки топлива для работы дизельного генератора.

Из этого можно сделать небольшой вывод, что внедрение ветроэнергетических установок (ВЭУ) в автономные энергосистемы поможет снизить производство электроэнергии в несколько раз, учитывая срок службы ветроустановки в 20-25 лет и высокий коэффициент использования установленной мощности, ввиду климатических условий.

Основной сегмент мощностей и проблемы внедрения ВЭУ в северные регионы.

Под основным сегментом мощностей подразумевается максимальная мощность ветрогенератора, которая будет экономически целесообразна для северных регионов. Основным сегментом мощностей ВЭУ является 100-500 кВт. Это обуславливается отсутствием инфраструктуры, спецтехники, и развитой логистики в отношении больших турбин в изолированных территориях.

Основными проблемами являются климатическое влияние на ветроустановки и технологическое отставание ВЭУ. Данные проблемы применимы только к указанному выше сегменту мощностей, так как развитие технологий у производителей направлено в сторону больших турбин от 4 МВт и выше.

Суровый арктический климат оказывает влияние практически на все детали ветроустановки. Наиболее часто встречается обледенение лопастей во время эксплуатации. Обледенение возникает при температуре воздуха в диапазоне от +3 °С до -6 °С и также при температурах ниже -20 °С.

Основные виды осадков, способствующих обледенению:

– Иней со льдом – это сильно охлажденные капли жидкости, переносимые ветром, чаще всего образуются из облаков или тумана при температуре ниже -20 °С.

– Стекловидный лед – имеет наибольшую плотность, образуется в диапазоне от 0 °С до -6 °С. Возникает в результате прохождения снежных осадков через слои теплого воздуха и последующим прохождением через слои холодного воздуха.

– Мокрый снег – кристаллы частично растаявшего снега с большим содержанием жидкости прилипают к поверхности объектов.

Под влиянием на остальные части ветроустановки подразумевается:

– Негативное влияние на различные материалы, использованные в турбинах. Изменение механических свойств стали, из которой сделано большинство компонентов. Изменение механических свойств композитных материалов лопастей, что напрямую влияет на генерацию ВЭУ. При низких температурах у материалов снижается способность к деформации без повреждений, они становятся менее прочными.

– Влияние на бетонные и цементные конструкции. Растрескивание материалов под термическим воздействием приводит к повышенной проницаемости конструкции и, как следствие, возникновение коррозии.

– Низкие температуры также оказывают влияние на электрические компоненты системы. Включение поворотных двигателей и питч системы может повредить статор из-за резкого увеличения тепла и, как следствие, наступит дифференциальное тепловое расширение в холодной машине. В жидкостных трансформаторах присутствует риск недостаточного отвода тепла от внутренних потерь обмоток, в связи с сильной вязкостью охлаждающих жидкостей. Вязкость смазочных материалов и гидравлических жидкостей увеличивается, в связи с чем происходит сильная нагрузка на насосы, снижается мощность редуктора турбины.

Адаптации и доработки ветроустановок для использования в холодном климате.

К основным адаптациям ВЭУ можно отнести:

– Систему анти-обледенения лопастей, на базе новых технологий. Окрас лопастей черной, способной нагреваться при

подаче электрического тока, краской. Также возможно использование технологий микровибрации лопастей.

– Отказ от редукторного исполнения ВЭУ. Применение прямого привода будет способствовать решению ряду проблем, описанных выше. Это поможет также продлить срок службы ветроустановки и снизить затраты на сервис.

– Использование технологии монтажа ВЭУ на винтовых сваях. Замена традиционного бетонного фундамента.

– Добавочная система обогрева гондолы. В случаях долгого простоя турбины это позволит избежать последствий холодного запуска.

– Доработка материалов ВЭУ, использование адаптированных смазочных и гидравлических жидкостей.

Выводы

В данной работе проанализированы основные проблемы использования ВЭУ в северных регионах России. Установлено, что можно говорить о целесообразности проектирования и производства технологии ветрогенератора мощностью от 100 до 500 кВт специально для северных регионов России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Wind Atlas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalwindatlas.info/>. – Дата доступа: 14.10.2021.

2. Software and Knowledge Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emd-international.com/>. – Дата доступа: 14.10.2021.

3. Башмаков И.А. Повышение энергоэффективности энергоснабжения в северных регионах России / И.А. Башмаков // Энергосбережение. – 2017. – № 2 (2017). – С.46-52. – Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6616.

Авторы:

Степушин Дмитрий Валерьевич, студент-магистр 2-го курса кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шаранова», Строительный факультет, УлГТУ.

Пазушкина Ольга Владимировна кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шаранова», УлГТУ. E-mail: o.pazushkina@yandex.ru.

ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МАЛЫХ ИСТОЧНИКОВ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Тошходжаева М.И., Комилова М.Ё., ХПИТТУ,
г. Худжанд, Республика Таджикистан

***Аннотация.** В статье проанализированы проблемы введения в эксплуатацию малых источников электроэнергии, составлена имитационная модель в среде Matlab SIMULINK промышленного предприятия с малым источником энергии, приведены результаты измерений нагрузок на стороне высокого и низкого напряжения трансформатора, определены время переходного процесса и характер переходного процесса в системе электроснабжения промышленного предприятия и его влияние на работы электроприемников.*

***Ключевые слова:** распределенная генерация, система электроснабжения, промышленные предприятия, качества электроэнергии.*

Из анализа международного опыта выявлено, что развитие распределенной генерации (РГ) в мире происходит в основном за счет строительства генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что является устойчивым трендом, оказывая влияние на режимы работы электрических систем (ЭС) и развитие регионов [1, 2].

При введении систем распределенной генерации смягчаются или устраняются следующие проблемы электроэнергетической системы:

- перегруз отдельных подстанций и магистральных линий электропередач;
- перегруз питающих и распределительных сетей;
- дефицит реактивной мощности.

Однако, при эксплуатации малых источников электроэнергии возникают проблемы синхронизации источников РГ с ЭС и обеспечение качества электроэнергии. Выше изложенная проблема актуальна в электрических сетях промышленных предприятий (рис. 1).

На рис. 1 показано модель системы электроснабжения Коврового комбината в среде Matlab SIMULINK [3]. В качестве основного источника питания принят ГЭС-24, длина линии до комбината составляет 2,5 км выполненные воздушными линия-

ми сечением 185 мм². На территории комбината установлен трехфазный трансформатор типа ТМ-4000/35/6. Данный трансформатор в настоящее время работает в режиме перегруза, коэффициент загрузки составляет 0,99, при коэффициенте мощности 0,87. Для более полного анализа все потребители на шинах низкого напряжения сгруппированы в одну эквивалентную нагрузку. Из-за того, что в данном регионе наблюдается дефицит активной и реактивной мощности, для нормального функционирования комбината будет установлена синхронный генератор типа Leroy-Somer серии LSA-52.3 (Франция) мощностью 1488 – 2000 кВт / 1860 – 2500 кВА (номинальная сила тока 2678 – 3600 А). Время включения выключателей составляет 0,001 с.

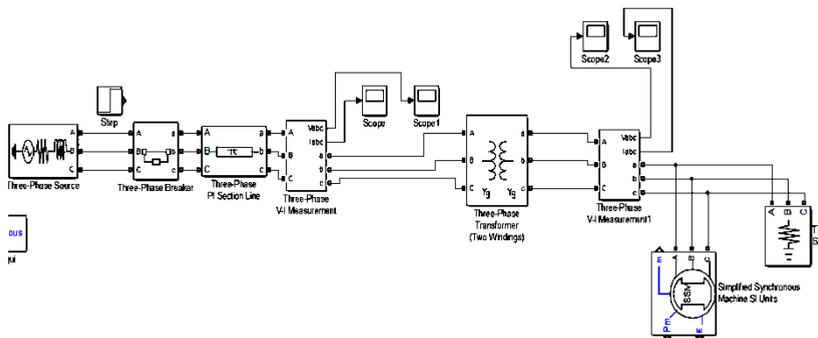


Рис. 1. Модель системы электроснабжения Коврого комбината в среде Matlab SIMULINK

При пуске синхронного генератора на стороне низкого и высокого напряжений трансформатора нарушается качества электроэнергии. Как показано на рис. 1 показание амперметра на стороне низкого напряжения в течении 0,1 происходит переходной процесс, нарушается синусоидальность и сдвиг градусов между фазами.

При пуске генератора также наблюдается снижение напряжения в течении 0,01 секунд (рис. 3). Такое явление негативно влияет на технологический процесс всего комбината.

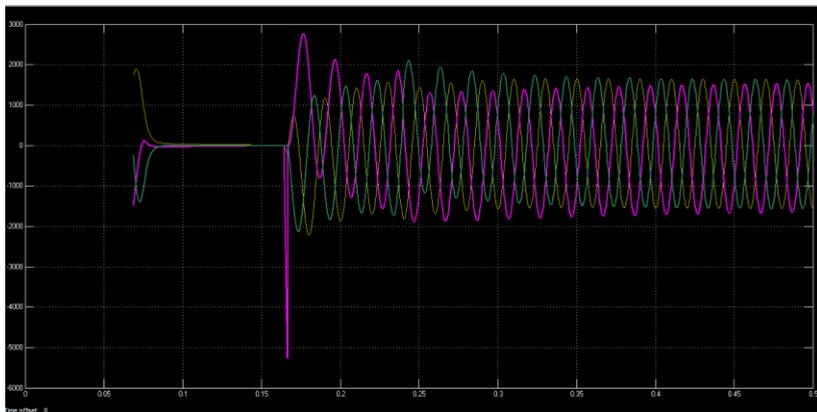


Рис. 2. Показание амперметра на стороне низкого напряжения трансформатора

При пуске генератора также наблюдается снижение напряжения в течении 0,01 секунд (рис. 3). Такое явление негативно влияет на технологический процесс всего комбината.

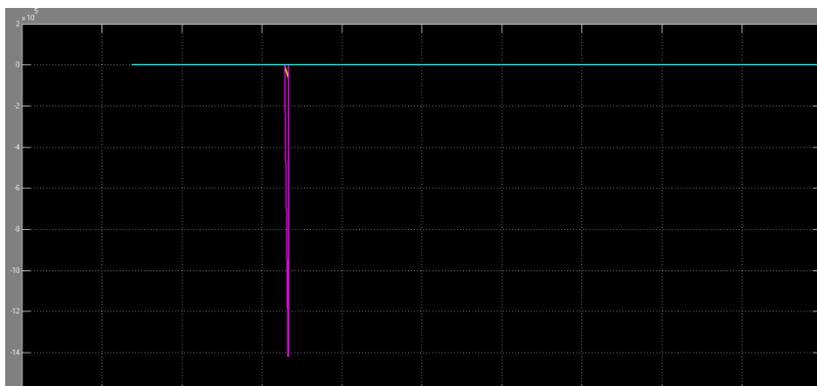


Рис. 3. Показание вольтметра на стороне низкого напряжения трансформатора

Пуск синхронного генератора также влияет на показатели качества электроэнергии на стороне высокого напряжения трансформатора (рис. 4).

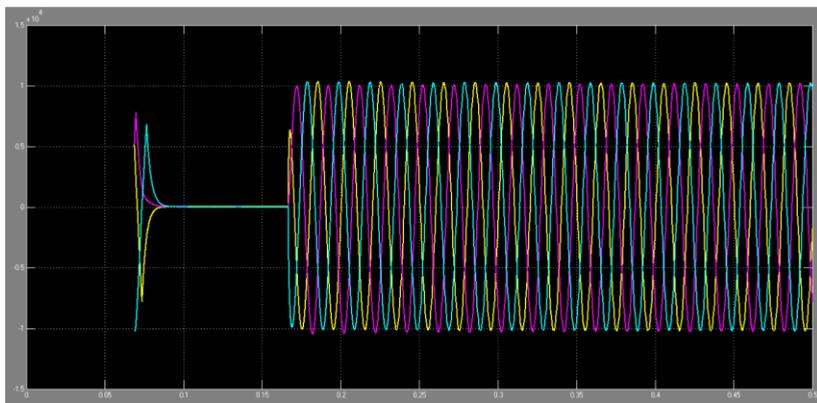


Рис. 4. Показание вольтметра на стороне высокого напряжения трансформатора

Как видно, из рис. 4 в момент переходного процесса наблюдается понижения напряжения до минимальных значений в течении 0,15 секунд, в дальнейшем не наблюдается нарушения качества электроэнергии, т.е. сохраняется синусоидальность напряжения и соблюдается градус сдвига фаз между отдельными фазами.

При этом из показания амперметра (рис. 5) видно, что после окончания переходного процесса в отдельных фазах наблюдается повышение токовой нагрузки в течении 0,3 секунд.

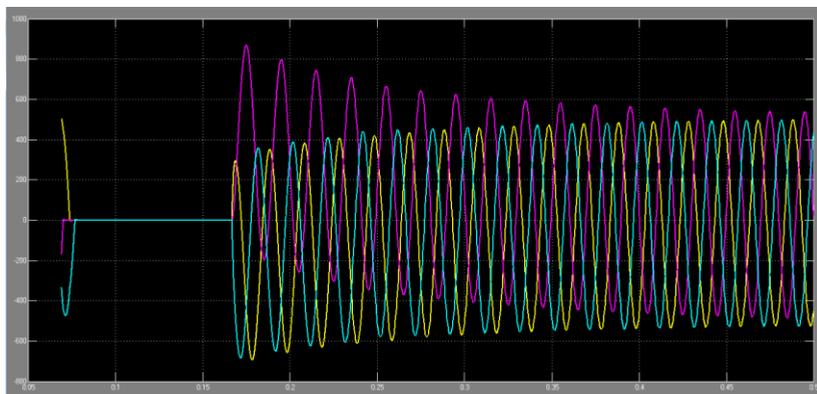


Рис. 5. Показание амперметра на стороне высокого напряжения трансформатора

Выводы

Из анализа выше приведенной модели следует, что система распределенной генерации в узлах низкого напряжения предприятий приемлема в условиях дефицита электроэнергии, но при эксплуатации таких источников возникает проблема поддержания напряжения и обеспечения качества электроэнергии, что требует отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Куликов А. Л., Осокин В. Л., Папков Б. В. Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики // Вестник нгиз. – 2018. – №. 11 (90)-С.123-136.

2. Рахимов О. С., Тошходжаева М. И. Распределенная генерация на основе возобновляемых источников энергии и перспективы их применения // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. – 2020. – С. 345-348.

3. Семёнов А. С., Якушев И. А., Егоров А. Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – №. 8. – С. 56-64.

Авторы:

Тошходжаева Мухайё Исломовна, кандидат технических наук, старший преподаватель Политехнического института Таджикского Технического Университета, окончила Худжандский Филиал Таджикского Технического Университета в 2004 году. Ученую степень получила 2019 году, защитила по тематике повышения надежности воздушных линий в условиях резко континентального климата. E-mail: shukrona14_01_2011@mail.ru.

Комилова Махбуба Ёдгоровна, старший преподаватель Политехнического института Таджикского Технического Университета. Окончила Таджикский Технический Университет в 1979 году. E-mail: komilova49@mail.ru.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Корнеев А.П., Niu Yitong, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

***Аннотация.** Приведены преимущества использования солнечной энергии. Представлены формулы расчета азимутальных и высотных углов Солнца. Выбраны формулы для расчета солнечного экваториального хвостового угла и разницы во времени Солнца.*

***Ключевые слова:** солнечная энергия, азимутальные и высотные углы Солнца, солнечный экваториальный хвостовой угол.*

Энергия играет очень важную роль в развитии человеческого общества. Энергия – основа экономического развития и национальной безопасности. Сегодня в мировом энергопотреблении преобладают ископаемые виды топлива, такие как нефть и уголь, в то время как новые источники энергии активно исследуются в качестве альтернативы [1].

Пропаганда зеленой защиты окружающей среды и развитие низкоуглеродной экономики стала основной темой экономического и социального развития в современном мире. Солнечная энергия – это экологически чистая возобновляемая энергия, которая является важным направлением развития энергетики. Отрасль солнечной энергетики имеет большой потенциал для развития, энергичное развитие и использование солнечной энергии имеет важное практическое значение. Разработка ключевых солнечных технологий еще не совершенна, промышленная база слаба, солнечная энергия всегда была в состоянии дополнить традиционную энергию, рынок солнечной энергии велик, но не силен, солнечная промышленность недостаточно сильна, чтобы развиваться [2].

По сравнению с другими источниками энергии, такими как уголь и нефть, солнечная энергия имеет следующие преимущества:

1. Универсальность: солнечный свет можно получать и использовать в разных областях, хотя интенсивность его излучения варьируется на разных широтах, объем его излучения уни-

версален, что является большим преимуществом для развития и использования солнечной энергии.

2. Безвредность: по сравнению с углем и нефтью, солнечная энергия является экологически чистым возобновляемым источником энергии, ее разработка и использование не вызовут загрязнения окружающей среды, что является преимуществом, которого нет у других источников энергии, что очень важно для сегодняшнего продвижения экологически чистого развития.

3. Безграничность: по сравнению с другими источниками энергии, солнечная энергия обладает огромным потенциалом, она может стать постоянным источником энергии, при долгосрочном развитии человеческого общества.

4. Долговечность: по сравнению со скоростью производства ядерной энергии Солнцем, накопленного в нем водорода достаточно для использования десятки миллиардов лет, по сравнению с жизнью Земли в миллиарды лет, солнечная энергия характеризуется долгим сроком использования.

В статье разрабатывается алгоритм слежения за траекторией движения Солнца для получения максимума солнечного излучения, основанного на изучении существующей теории слежения, которая сочетает отслеживание кажущейся траектории движения Солнца с фотоэлектрическим слежением, тем самым преодолевая проблему накопления ошибок в отслеживании кажущейся траектории движения Солнца [3].

Выбор формулы для расчета угла высоты Солнца и азимутального угла

В основе метода отслеживания траектории видимого движения Солнца лежат различные астрономические алгоритмы, задействованные на солнечной орбите. Выбор астрономических алгоритмов очень важен для повышения точности метода отслеживания траектории видимого движения Солнца. Эти алгоритмы можно разделить на две категории: одна представляет собой относительно простые алгоритмические формулы, такие как солнечное равноденствие и разница во времени, которые могут быть аппроксимированы с использованием формул после заданного значения даты и второй класс алгоритмов, который учитывает больше переменных и требует больших вычисли-

тельных ресурсов, где эклиптика, склонение, зенитное расстояние и азимут Солнца могут быть вычислены с учетом географического положения (широта, долгота и время) [4].

Идеи расчета заключаются в том, чтобы сначала вычислить солнечное равноденствие и разницу во времени, затем вычислить местный угол солнечного времени на основе разницы во времени, и использовать вычисленное солнечное равноденствие, солнечное время и угол как независимые переменные, и вычислить угол высоты Солнца и угол азимута.

Формулы для расчета азимутального и высотного углов Солнца в геодезической системе координат (1) и (2):

$$\cos A = \frac{(\sin h \sin \phi - \sin \delta)}{\cos h \cos \phi} \quad (1)$$

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \tau, \quad (2)$$

где A – солнечный азимут точки наблюдения; h – угол высоты Солнца в точке наблюдения; δ – угол склонения Солнца; ϕ – географическая широта точки наблюдения; τ – истинный солнечный временной угол в точке наблюдения.

Из приведенных формул видно, что ключом к вычислению солнечной высоты и азимута является вычисление солнечного равноденствия и солнечного временного угла, поэтому точность этого вычисления напрямую влияет на точность вычисления солнечной высоты и азимута.

Выбор формулы для расчета солнечного экваториального хвостового угла.

Поскольку существует угол между плоскостью орбиты вращения Земли вокруг своей оси и плоскостью орбиты вращения Земли вокруг Солнца, а угол солнечного склонения изменяется, его можно только определять по ежегодному астрономическому альманаху. Поэтому при практическом применении солнечной энергии можно суммировать простой алгоритм определения угла склонения Солнца, объединив существующие астрономические знания.

Точность формулы расчета солнечного экваториального угла, предложенная Вангом, является наилучшей. Максималь-

ное отклонение не более $0,1^\circ$ и минимальное отклонение около $0,027^\circ$ по сравнению со значением, записанным в астрономическом альманахе, среднее отклонение составляет всего $0,00401^\circ$ [5].

Расчет солнечного экваториального хвостового угла определяется по формуле:

$$\delta_4 = 0.3723 + 23.2567 \sin \theta + 0.1149 \sin \theta - 0.1712 \sin \theta - \\ - 0.758 \cos \theta + 0.3656 \cos 2\theta + 0.0201 \cos 3\theta, \quad (3)$$

где $\theta = \frac{2\pi t}{365.2422}$, $t = N - N_0$, N – текущий день,

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422 \times (\text{year} - 1985) - \text{INT} \left[\frac{(\text{year} - 1985)}{4} \right],$$

где INT – это целое число, например $\text{INT} (5.34) = 5$.

Выбор формулы для расчета разницы во времени Солнца.

Поскольку продолжительность истинного солнечного дня меняется каждый день, чтобы получить относительно равное и постоянное солнечное время, общая практика состоит в том, чтобы представить солнце, называемое плоским солнцем, а плоское солнечное время является эталоном системы времени. Чтобы иметь возможность рассчитать угол солнечного времени и, таким образом, получить угол изменения солнечной высоты, первым шагом является определение разницы между истинным солнечным временем и плоским солнечным временем.

Поскольку истинное солнечное время меняется каждый день, разница во времени также меняется каждый день, что вносит неопределенность в расчет отношения положения Солнца в реальном времени, а точность его расчета также напрямую влияет на изменения угла солнечной высоты и азимутальный угол. Для нужд научных исследований и практического производства, таких как экваториальный угол Солнца, ученые обобщили некоторые формулы расчета разницы во времени.

Сравнительный анализ формул для расчета солнечного экваториального угла и разницы во времени показывает, что уравнение (3), предложенное Вангом, имеет наилучшую точность

для вычисления экваториального угла, а уравнение (4), предложенное Ламмом имеет лучшую точность для вычисления разницы во времени. Точность этих двух простых алгоритмов не высока по сравнению со сложными алгоритмами, предложенными в [5], в практических инженерных решениях надо учитывать не только точность алгоритмов, но и сложность, работоспособность и стоимость реализации.

Формула для вычисления разницы во времени:

$$E_{t4} = \sum_{k=0}^5 \left[A_k \cos\left(\frac{2\pi kN}{365.25}\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi kN}{365.25}\right) \right] \quad (4)$$

где N – номер дня в 4-летнем цикле, начинающемся с каждого високосного года.

Значения A_k, B_k можно найти в таблице.

Таблица

Значения параметров A_k, B_k

k	A_k	B_k
0	$2.087e^{-4}$	0
1	$9.2869e^{-3}$	$-1.2229e^{-1}$
2	$-5.2258e^{-2}$	$-1.5698e^{-1}$
3	$-1.3077e^{-3}$	$-5.1602e^{-3}$
4	$-2.1867e^{-2}$	$-2.923e^{-3}$
5	$-1.51e^{-4}$	$-2.3463e^{-4}$

Выводы

Выбраны формулы расчета азимутальных, высотных углов Солнца, солнечного экваториального хвостового угла и разницы во времени Солнца для получения максимума солнечного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Niu Yitong*. Analysis of energy structure and alternative energy development / Yitong Niu, Andrei Korneev. – Insight-Civil Engineering, Volume 4 Issue 1, 2021, ISSN: 2630-4716 – P. 23 – 30

2. *Li Anding*. Solar photovoltaic power generation system engineering. – Chemical Industry Press, 2012 – 000(011), P. 52-56.

3. *Niu Yitong*. Optimization of the structure, elements and study of the operating modes of a power plant using solar energy. – Master thesis, Belarusian-Russian University, 2021.

4. *Blanco-Muriel M.* Computing the solar vector / M. Blanco-Muriel, D.C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla, M. Lara-Coira. – Solar Energy, 2001, 70(5), P. 431-441.

5. *Wang Bingzhong*. Recalculation of astronomical parameters commonly used in solar observation / Bingzhong Wang, Gengshan Liu. Journal of Solar Energy, 1991, 12(1), P. 27-32.

Авторы:

Корнеев Андрей Петрович, старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета. Закончил электротехнический факультет Белорусско-Российского университета в 2002 году. E-mail: ankorn@tut.by.

Niu Yitong, магистрант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета. Магистр технических наук, 2021 год, тема «Оптимизация конструкции, элементов и исследование режимов работы электростанции на солнечной энергии». E-mail: itong_niu@163.com.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Латышов А. Ю., Марченко А.В., Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

***Аннотация.** В проекте описаны особенности данной установки, которая способствует повышению температуры исходной воды, за счет снятия «полезной» теплоты с отводимых сточных вод при помощи тепловых трубок замкнутого контура. Научная новизна внедрения заключается в использовании тепловых трубок в системе водоснабжения и водоотведения частного или многоквартирного дома с индивидуальной системой горячего водоснабжения.*

***Ключевые слова:** тепловые трубки, канализационная установка, исходная вода, сточная вода.*

Описание установки

Тепловая трубка – это элемент системы охлаждения, задача которой заключается в эффективной теплопередаче энергии от одного источника к другому. Тепловая трубка способна транспортировать тепло на большие расстояния с помощью различного типа теплоносителя при небольших изменениях температур.

Работа тепловых трубок заключается в том, что передача тепловой энергии происходит из-за плотностей жидкости в контуре трубки. Если представить резервуар из меди или алюминия, обладающий высокой теплопроводностью, с некоторым объемом жидкости, то при нагревании одной из частей емкости жидкость превращается в пар, т.е. жидкость переходит в газообразное состояние.

Тепловые трубки могут быть заполнены жидкими веществами, которые способны переходить из жидкого состояния в газообразное при заданной температуре эксплуатации трубки.

Предложное авторами техническое решение включает в себя тепловые трубки замкнутого контура.

Технической проблемой, на решение которой направлена полезная модель, является разработка канализационной установки жилого дома с использованием теплоты сточных вод.

Технический результат - повышение температуры холодной воды за счет замкнутого контура тепловых трубок, которые передают теплоту сточной воды холодной водопроводной воде.

Особенностью канализационной установки является то, что в трубопроводе канализации, имеет футляр с утеплением из пенополиуретана, где в трубопроводе канализации установлен испаритель, а в трубопровод водопроводной воды вмонтирован конденсатор, связанные между собой тепловыми трубками замкнутого контура (паропроводом и конденсаторопроводом), которые оснащены фитилем, служащим для создания капиллярного давления, необходимого для перекачивания жидкости.

На рис. 1, изображен режим работы канализационной установки, которая работает следующим образом.

Нагретый до точки кипения теплоноситель под пониженным давлением движется по паропроводу, поступая в конденсатор, где конденсируется, отдавая свою теплоту холодной воде. Затем сконденсировавшаяся жидкость поступает по конденсаторопроводу в компрессионную полость испарителя. Из-за разности плотностей жидкости в контуре конденсатора, парожидкостной смеси в паропроводе испарителя создается насосный эффект, обеспечивающий движение жидкости по контуру тепловой трубки и поступление ее в испаритель.

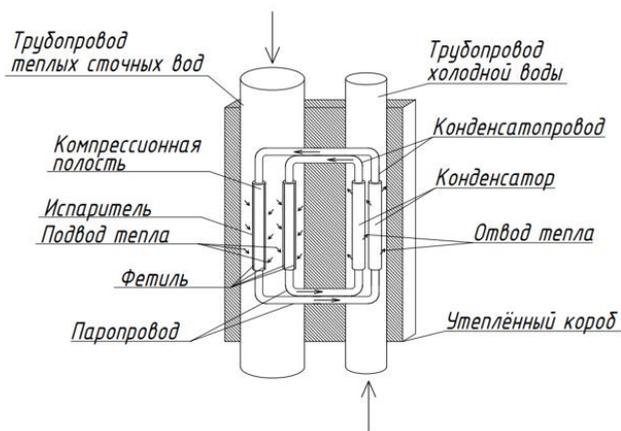


Рис. 1. Режим работы канализационной установки

Достоинством такой данной модели является: высокий уровень теплопередачи, простота конструкции, надежность в рабо-

те, хорошая степень адаптации к различным условиям, сохранение рабочих характеристик. [1].

Выводы

Таким образом, предложенная авторами канализационная установка с тепловыми трубками замкнутого контура позволяет снизить затраты электроэнергии или газа для индивидуальной системы горячее водоснабжение за счет повышения температуры холодной вод, где срок окупаемость составляет 5,9 лет при общей эксплуатации 25 лет. А также обеспечить автоматическое управления режимами работы системы для повышения энергоэффективности в зависимости от температуры сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. Изд-во Моск. ун-та, 1979. 273 с.
2. Сорокин А.Д. Тепловые трубки и применение технологий на их основе для охлаждения узлов ПК// Строительство [Электронный ресурс]. URL: <http://www.electrosad.ru/Ohlajd/Cooltt1.htm> (10.09.2020).

Авторы:

Латышов Антон Юрьевич, магистрант строительного факультета Ульяновского государственного технического университета. E-mail: latyshov.anton@mail.ru.

Марченко Александра Витальевна, доцент, кандидат технических наук строительного факультета Ульяновского государственного технического университета. Тема кандидатской диссертации – «Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей». E-mail: al-marchenko@yandex.ru.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Александров Н.М., Зарубин Д.В., НПП «Динамика»,
г. Чебоксары, Россия

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

Аннотация. В статье приведены методы аналитического расчета электродинамических сил, возникающих в обмотке при протекании сквозных токов КЗ, а также приведен метод уточненного расчета методами компьютерного моделирования.

Ключевые слова: силовой трансформатор, обмотка, деформации, электродинамическая сила.

При протекании сквозных токов КЗ через обмотку силового трансформатора, на неё оказывается большое воздействие электродинамических сил, которые деформируют обмотку.

В качестве уравнения, описывающего вогнуто-выпуклую радиальную деформацию витка токопровода, выбрана функция $\varepsilon(\phi)$, записанная в полярных координатах (1):

$$\varepsilon(\phi) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \phi / \Phi), \text{ при } 0 \leq \phi < \Phi, \quad (1)$$

где a – предельное отклонение искаженного участка от идеального состояния (м).

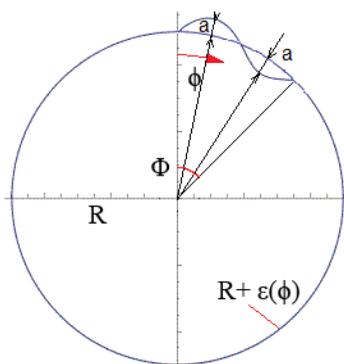


Рис. 1. Геометрическая интерпретация деформации витка обмотки

Радиальные силы, действующее на обмотки двухобмоточного трансформатора, стремятся увеличить расстояние между обмотками δ_{12} (рис. 2).

При известной форме витка (1), радиальная сила, действующая на обмотку, рассчитывается по формуле

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\text{макс}} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + a \cdot \sin(2\pi\varphi / \Phi))}{2h} \quad (2)$$

где F_r – радиальная сила; μ_0 – магнитная проводимость; $I_{\text{макс}}$ – амплитуда тока КЗ; ω – количество витков обмотки; ρ_1 – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского); D_{12} – расстояние от стенки бака до середины промежутка между обмотками; h – высота обмотки.

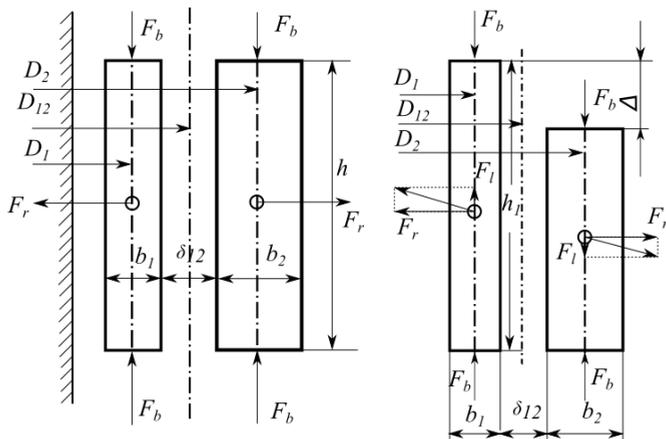


Рис. 2. Радиальные и осевые силы, действующие на обмотки силового трансформатора

Рассмотрим теоретический случай, когда виток (или сегмент) обмотки радиусом R (равный внутреннему или внешнему радиусу согласно рис. 3), расположенный между магнитопроводом и стенкой бака незначительно деформирован, а его форма изменена и представляет эллипс.

Уравнение геометрической деформации в первом приближении при малых значениях отношения ε/R выглядит следующим образом:

$$\delta(r, \varphi) = r - R = \varepsilon \cdot \cos(2\varphi) \quad (3)$$

где R – радиус недеформированной обмотки, r – кривая, описывающая эллиптическую деформацию, $\varepsilon = R - r(90^\circ)$.

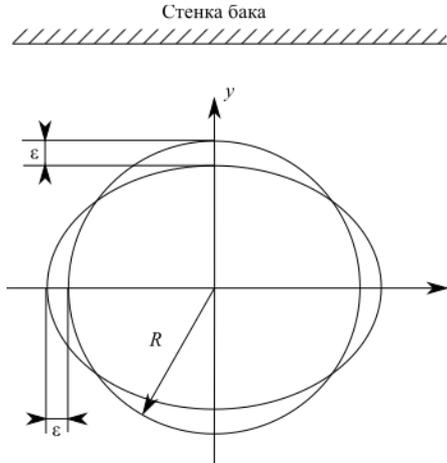


Рис. 3. Эллиптическая деформация витка обмотки

Подставляя уравнение эллиптической деформации в формулу силы при радиальной деформации, получим

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\text{макс}} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + \varepsilon \cdot \cos(2\varphi))}{2h} \quad (4)$$

Осевая деформация возникает под действием осевых сил, стремящихся уменьшить высоту обмотки. Следовательно, для расчета силы требуется взять производную от энергии магнитного поля рассеяния по высоте.

Если рассматривать осевую деформацию как изменение высоты обмотки, тогда формула осевой деформации будет иметь вид $\Delta = h_{\text{ВН}} - h_{\text{НН}}$, где $h_{\text{ВН}}$ и $h_{\text{НН}}$ – высоты обмотки высокого и низкого напряжения соответственно, а Δ – разность высоты обмоток.

Из этого следует, что $h_{\text{ВН}} = h_{\text{НН}} + \Delta$.

Можно подставить в формулу

$$F_{\text{axial}} = - \frac{\mu_0 (I_{\text{макс}} \omega)^2 \rho_1 \pi D_{12} \delta'}{2(h_{\text{НН}} + \Delta)} \quad (5)$$

где $\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}$, это предельная ширина главного канала рассеяния.

Предложенные уравнения для радиальной и осевой сил учитывают форму и величину деформации, выраженные в виде тригонометрических и линейных зависимостей.

Приведенные модели позволяют лишь интегрально оценить порядок действующих на обмотки сил. Более точное их значение можно получить лишь методами численного математического моделирования электромагнитного поля в статике и динамике.

Современное развитие компьютерных технологий позволяет решить подобные задачи с использованием численных методов в двумерной или трехмерной постановке, повысив точность при определении основных параметров трансформатора. Численное моделирование магнитных процессов позволяет с достаточной степенью точности определить характеристики магнитного поля в расчетной области, в результате чего могут быть найдены механические усилия, действующие на каждый отдельный виток обмотки.

Основой численных методов решения электромагнитных процессов являются дифференциальные уравнения в частных производных. В общем случае электромагнитное поле описывается известной системой уравнений Максвелла. Рассматриваемая задача представляет собой трехмерную математическую модель в нестационарной постановке. Подобные задачи описываются системой уравнений относительно векторного магнитного потенциала ($\mathbf{B} = \text{div}\mathbf{A}$, с учетом калибровки Кулона: $\text{div}\mathbf{A} = 0$) и скалярного потенциала ϕ . После простейших преобразований формулировка нестационарного магнитного поля в общем случае имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla^2\phi + \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \mathbf{A}) = -\frac{\rho}{\epsilon_0}; \\ \left[\nabla^2\mathbf{A} - \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} \right] - \nabla \left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} \right) = -\mu_0\mathbf{J}. \end{cases}$$

Основными преимуществами численной модели, по сравнению с упрощенными аналитическими, являются:

- трехмерная постановка, которая учитывает относительное расположение активных частей трансформатора, конфигурацию магнитопровода, витков обмоток и наличие стального бака;
- учет нелинейных свойств используемых материалов.

Этим методом были рассчитаны электромагнитные усилия, действующие в режиме КЗ, как на отдельные витки, так и на всю обмотку.

В качестве примера в работе приведены результаты моделирования электромагнитных процессов для определения механических нагрузок в режиме внезапного короткого замыкания трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора ТМ 1600/35 (рис. 4).

На рис. 4 видно, что магнитное поле рассеяния трансформатора в режиме короткого замыкания имеет сложную структуру. Картина магнитного поля симметрична относительно оси абсцисс. Наибольшая плотность магнитного потока сосредоточена в пространстве между катушками, где магнитная индукция достигает максимальной величины. В средней части обмотки по высоте величина магнитной индукции снижена за счет расположения здесь регулировочных катушек с меньшим количеством витков и увеличенных радиальных каналов в обмотке низкого напряжения. Часть магнитного потока замыкается по стенкам бака, вызывая дополнительные потери и механические усилия.

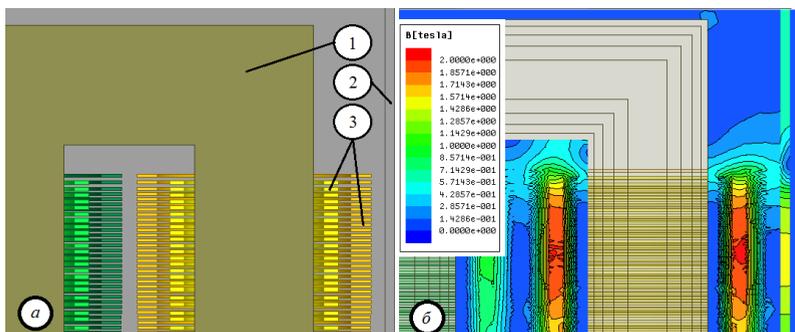


Рис. 4. Трехфазный двухобмоточный масляный трансформатор:

a – геометрическая модель трансформатора:

1 – магнитопровод; 2 – бак; 3 – обмотки трансформатора;

б – картина магнитного поля в режиме короткого замыкания

На рис. 5 представлены результаты моделирования в виде диаграмм распределения механических усилий по отдельным катушкам обмотки ВН и виткам обмотки НН. Видно, что на об-

мотку НН оказывается сжимающее механическое усилие, а на обмотку ВН – равное по величине растягивающее.

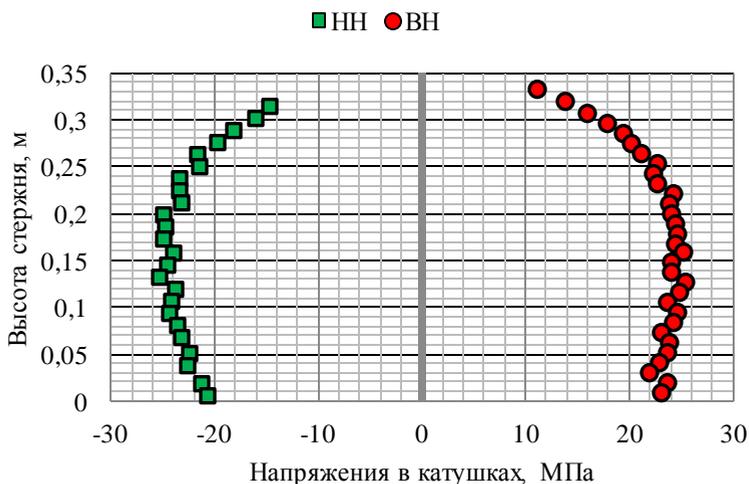


Рис. 5. Механические напряжения, действующие на катушки и витки обмоток

На рис. 6 представлена кривая переходного процесса по среднему сжимающему радиальному напряжению для обмотки низкого напряжения в режиме короткого замыкания.

Из рис. 6 видно, что ударное среднее сжимающее напряжение значительно больше установившегося значения и может представлять существенную опасность для обмотки. Среднее сжимающее радиальное напряжение оказалась на 45,5 % выше рассчитанного по традиционной аналитической методике и составило 39,8% от допустимого напряжения.

Моделирование электромагнитного поля при протекании токов КЗ позволяет рассчитать усилия и вызванные ими деформации витков. Для диагностики имеющихся деформаций витков и обмотки в целом, необходимо иметь частотные характеристики недеформированной обмотки и обмотки исследуемой. Для получения их частотных характеристик можно воспользоваться либо специализированными устройствами, либо моделью обмотки.

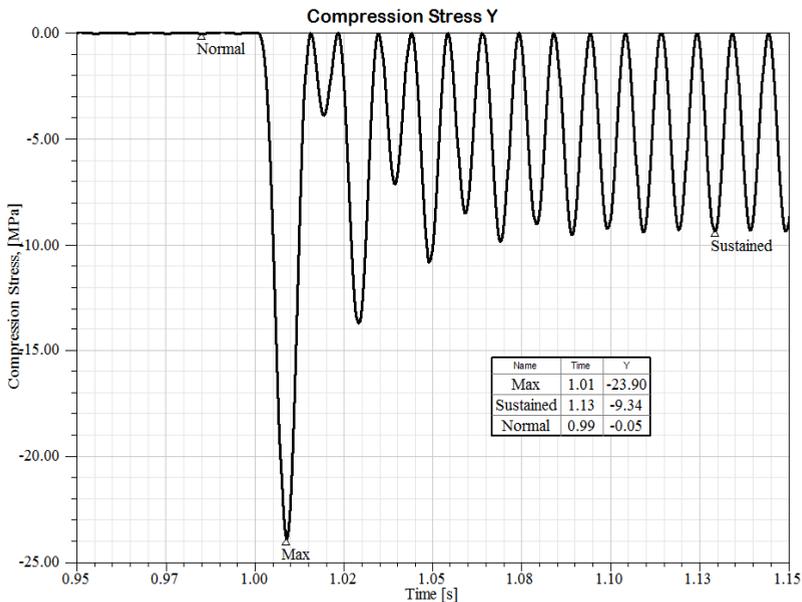


Рис. 6. Сжимающее радиальное напряжение обмотки низкого напряжения при внезапном КЗ

Выводы

Установлено, что традиционные аналитические расчеты электродинамических усилий в обмотках трансформаторов требуют существенных допущений и дают только приближенную интегральную оценку механических напряжений в обмотке, не учитывающую различное положение отдельных витков и реальную конфигурацию магнитного поля в режиме короткого замыкания. Уточненную картину пиковых электромагнитных усилий и механических напряжений для каждого витка дает предложенная автором математическая модель, основанная на трехмерном численном расчете магнитного поля. Среднее значение сжимающего радиального усилия на обмотку, полученное по результатам численного моделирования, на 45,5 % выше, чем полученное по упрощенным аналитическим методикам. А усилие, действующее на витки, расположенные в центре катушек, на 33,2 % больше, чем среднее по обмотке.

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. *Васютинский С.Б.* Расчет и проектирование трансформаторов. – Л.: ЛПИ, 1976. – 84 с.

4. *Mariana Dalarsson* Online power transformer diagnostics using multiple modes of microwave radiation // Universitets service US AB. – Stockholm. – 2013. – 86 p.

5. *Львов М.Ю.* Анализ повреждаемости силовых трансформаторов // Электричество. 2010. №2. С. 27–31.

6. *А.И. Лурье.* Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Знак, 2005. 520 с.

7. *Хренников А.Ю.* Разработка математических моделей внешнего диагностического воздействия импульса на схему замещения обмоток высоковольтных электрических аппаратов // ЭЛЕКТРО № 2. 2008. С. 7-11.

8. *G. Bertagnolli,* The ABB Approach to Short-circuit Duty of Power Transformers // 3rd ed. Zurich, Switzerland: ABB Ltd. - 1996.

9. *S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde,* Transformer Engineering: Design and Practice, 1 ed. New York: Marcel Dekker Inc, - 2004.

10. *Александров Н.М., Хренников А.Ю.* Оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов // Материалы XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем», 7 июня 2019 г., Чебоксары, с. 378-382.

Авторы:

Александров Николай Михайлович, кандидат технических наук, начальник отдела первичного оборудования НПП «Динамика». E-mail: nickdynamics@gmail.com.

Хренников Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, Учёный секретарь НТС – начальник отдела НТИ НТЦ ФСК ЕЭС.

Зарубин Дмитрий Владимирович, начальник отдела преобразовательной и измерительной техники НПП «Динамика».

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SCADA-СИСТЕМЫ

Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Спиридонова А.С., Шарафутдинов Н.Р., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье представлено описание учебно-демонстрационного стенда РЗА АСУ ТП, предоставленного факультету радиоэлектроники и автоматики предприятием АО «ЧЭАЗ». Рассматриваются лабораторные работы, выполненные на стенде РЗА и АСУ ТП.*

Обучающиеся по направлению подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах» в процессе выполнения лабораторных работ приобретают базовые навыки для работы с реальной SCADA-системой и оборудованием.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, SCADA – система, стенд РЗА.

Электрические машины широко используются в различных отраслях промышленности, ими потребляется до 80% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. В последние десятилетия, с развитием преобразовательной и микропроцессорной техники, стали успешно применяются вентильные двигатели с постоянными магнитами. Основными преимуществами приводов на базе таких электродвигателей являются:

- высокая кратковременная перегрузочная способность по моменту, достигающая 10 кратного значения от номинального;
- высокие энергетические показатели ($\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,9\div 0,98$);
- существенно меньшие масса и габариты.

В частности, широко применяются вентильные двигатели с постоянными магнитами в приводах систем автоматики и робототехники, в транспортных средствах.

Во многих производствах внезапный выход из строя двигателя может привести к непоправимым последствиям. В связи с этим важным условием эффективной эксплуатации электрооборудования является своевременная диагностика неисправностей путём постоянного контроля и оценки состояния. Это особенно актуально, когда используется оборудование, выработавшее

свой нормативный срок службы. Функциональная схема SCADA-системы для диагностики состояния электродвигателя и на основе анализа потребляемого тока и напряжения представлена на рис. 1.

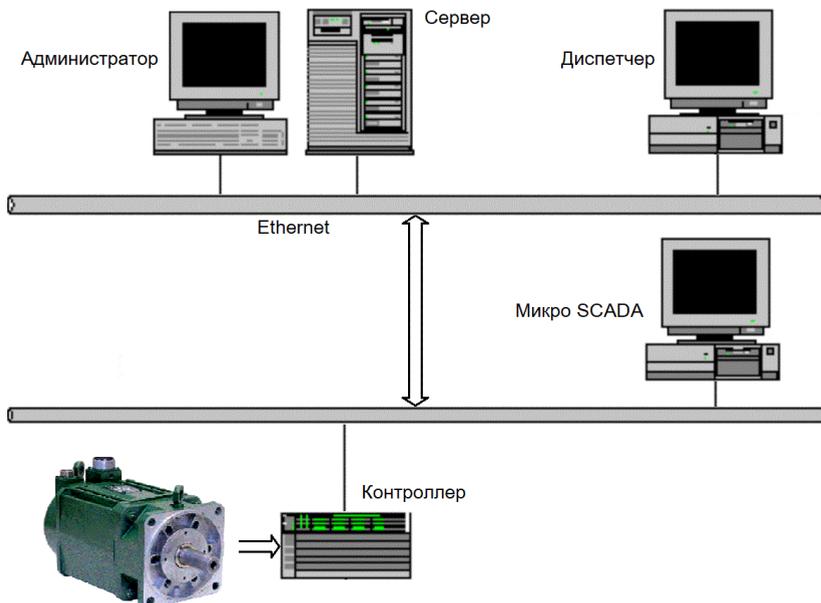


Рис. 1. Функциональная схема SCADA-системы

В состав комплекса входят: датчики тока и напряжения с необходимыми фильтрами, препятствующих появлению помех, контроллер, интерфейсы, сервер и компьютеры, обеспечивающие сбор, обработку, визуализацию и архивирование информации. В SCADA-системе может осуществляться специализированный анализ сигналов, получаемых с датчиков.

Наиболее частыми причинами выхода из строя электродвигателей являются межвитковыми замыканиями в обмотке статора и несоосность ротора, которая может возникнуть при изготовлении, например, из-за дефектов подшипниковых щитов, или чаще в эксплуатации, из-за износа подшипников. При несоосности ротора в первом случае участок воздушного зазора с минимальным размером (эксцентриситетом) неподвижен, связан с

конкретным местом поверхности расточки статора, во втором - будет вращаться вместе с ротором.

В [1] представлен анализ математических моделей вентильного двигателя с постоянными магнитами, описывающие процессы при возникновении упомянутых выше дефектов. Ниже схематично представлены алгоритмы исследования указанных математических моделей.

Алгоритм анализа математической модели вентильного двигателя при межвитковых замыканиях в обмотке статора

Исходные положения:

1) предполагается, что источником питания двигателя является статический преобразователь частоты со звеном постоянного тока, управляющийся по сигналам резольвера (датчика положения ротора), обеспечивающий ток и напряжение практически синусоидальными;

2) короткое замыкание охватывает один или несколько витков, принадлежащих одной из параллельных ветвей;

3) наличие несимметрии в фазах обмотки соединенных в звезду вызовет смещение нейтрали, при этом будем считать линейные напряжения (u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}) на входных зажимах статорной обмотки симметричными.

Из равенства для фазных токов для фазных напряжений справедливы выражения

$$u_A = \frac{d}{dt} \left[\begin{array}{l} L_{A\Delta A0} i_{A0} + (L_{A\Delta A1} - L_{A\Delta C}) i_{A1} + \\ + (L_{A\Delta A\Delta} - L_{A\Delta C}) i_{A\Delta} + \\ + (L_{A\Delta B} - L_{A\Delta C}) i_B + L_{A\Delta M} I_M \cos \omega t \end{array} \right] + r_{A\Delta} i_{A\Delta}, \quad (1)$$

$$u_B = \frac{d}{dt} \left[\begin{array}{l} L_{BA0} i_{A0} + (L_{BA1} - L_{BC}) i_{A1} + \\ + (L_{BA\Delta} - L_{BC}) i_{A\Delta} + \\ + (L_{BB} - L_{BC}) i_B + L_{BM} I_M \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right] + r_B i_B, \quad (2)$$

$$u_C = \frac{d}{dt} \left[\begin{array}{l} L_{CA0}i_{A0} + (L_{CA1} - L_{CC})i_{A1} + \\ + (L_{CA\Sigma} - L_{CC})i_{A\Sigma} + \\ + (L_{CB} - L_{CC})i_B + L_{CM}I_M \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right] + r_C i_C, \quad (3)$$

где $I_M = H_{cB}h_M$, здесь H_{cB}, h_M – соответственно коэрцитивная сила и высота постоянного магнита; ω – угловая частота тока и напряжения статора; $r_{A\Sigma}$ – активное сопротивление параллельно включённых бездефектных ветвей фазы А обмотки статора.

Из приведенных выражений (1-3) получены дифференциальные уравнения для независимых переменных $i_{A0}, i_{A1}, i_{A\Sigma}, i_B, \omega$ и дифференциальные уравнения, соответствующих равновесиям напряжений для двух независимых контуров дефектной, предположим, фазы А, один из которых и является причиной аномального режима.

Индуктивности само- и взаимной индукции обмотки статора находились из решения двухмерной полевой задачи, позволяющей определить магнитные индукции и магнитные потоки, вызванные отдельно токами $i_{A0}, i_{A1}, i_{A\Sigma}, i_B, i_C, I_M$.

Численными методами получены решения уравнений, соответствующие нагрузке двигателя 6ДВМ 300 А35 [2], серийный выпуск которого производится АО ЧЭАЗ. Номинальный момент двигателя 70 Нм при линейном напряжении 380 В.

Из решения следует, что ток в короткозамкнутом витке несинусоидальный и превышает 500 А. Ток в оставшейся части фазы А (i_{A1}) около 180 А и практически синусоидален. Наибольшие амплитуды имеют токи фаз В и С, в которых нет короткозамкнутых витков. Фазные напряжения обмоток статора несинусоидальны, в большей степени это наблюдается в бездефектных фазах В и С. Таким образом, имеет место смещение нейтрали обмотки статора.

Токи замкнутых контуров оказывают размагничивающее действие на магнитный поток в воздушном зазоре, что приводит к почти трёхкратному росту электрической частоты ω вращения двигателя: со значения 150 до 410 рад/сек.

Расчёты показывают, что при достаточно большом числе закороченных витков обмотки статора (для рассматриваемого двигателя при $w_{A0} = 6$) электромагнитный момент становится меньше номинального нагрузочного момента на валу и ротор «опрокидывается».

Алгоритм анализа математической модели вентильного двигателя с постоянными магнитами при несоосности ротора

При рассмотрении явлений в двигателе, обусловленных несоосностью ротора, приняты следующие допущения:

- 1) магнитные проницаемости статорного сердечника и ярма ротора равны бесконечности;
- 2) зубчатость статора учитывается в среднем с помощью коэффициента Каргера;
- 3) магнитное поле в неоднородном воздушном зазоре, создаваемое магнитами ротора и током обмотки статора, плоскопараллельно, имеет двухмерный характер.

Расчеты магнитного поля в воздушном зазоре двигателя выполнены с использованием конформного преобразования неравномерного воздушного зазора в плоскости z в равномерный (круговое кольцо) в плоскости t . Конформное преобразование производится по формуле [3, 4]

$$t = \frac{(A+1)z - (z_1'A + z_1)}{(A-1)z - (z_1'A - z_1)}, \quad (4)$$

где $A = \sqrt{\frac{r_2^2 - (d+r_1)^2}{r_2^2 - (d-r_1)^2}}$; z_1, z_1' – диаметральные точки внутренней окружности; r_1, r_2 – радиусы соответственно внутренней и наружной окружностей; d – смещение центров окружностей.

Поле в кольцевой области комплексной плоскости t определено как решение первой краевой задачи с известными скалярными магнитными потенциалами $t = f_1(\varphi)$ и $t = f_2(\varphi)$, соответственно на внутренней единичного радиуса и наружной, радиуса R , окружностях.

Расчеты выполнены также применительно к вентильному двигателю 6ДВМ300 А35. Получены зависимость скалярного потенциала на внутренней границе кругового кольца, магнитный потенциал и радиальная индукция внутри кругового кольца и т.д.

С помощью конформного преобразования устанавливается связь магнитных индукций в комплексных плоскостях z и t

$$B(z) = B(t) \left| \frac{dt}{dz} \right|. \quad (6)$$

$$\text{где } \left| \frac{dt}{dz} \right| = f(z) = \frac{(A+1)[(A-1)z - (z_1' A - z_1)] - (A-1)[(A+1)z - (z_1' A + z_1)]}{[(A-1)z - (z_1' A - z_1)]^2}. \quad (7)$$

По выражениям (6) и (7) получены радиальные составляющие магнитных индукций на границах воздушного зазора. Из-за смещения внутренней окружности в направлении радиуса с нулевой угловой координатой при значениях близких $\varphi = 0$ (2π), получаются наибольшие значения максимумов индукции.

Затем определены амплитудные значения индуктивностей взаимной индукции L_{AfV} магнитов ротора с фазой А обмотки статора двигателя.

Принимается, что вентильный двигатель имеет в обмотке статора синусоидальные ток и напряжение, фазные углы которых могут быть привязаны к угловому положению ротора. Тогда электромагнитный момент определяем, используя равенство (7) и предполагая, что фазные токи находятся в противофазе с ЭДС холостого хода

$$M(\varphi) = \frac{1}{2} \frac{p}{\omega} \left[e_{A0}(\varphi) i_A(\varphi) + e_{A0}(\varphi - 2\pi/3) i_A(\varphi - 2\pi/3) + e_{A0}(\varphi - 4\pi/3) i_A(\varphi - 4\pi/3) \right], \quad (11)$$

где $i_A(\varphi) = I_m \cos p\varphi$.

Получено, что при несоосности ротора рассматриваемого двигателя, например, 1 мм появляется переменная составляющая электромагнитного момента, имеющая частоту, в шесть раз превышающую частоту тока статора, и глубина пульсаций которой при номинальном токе составляет 7,1 % от номинального момента.

В случае, если эксцентриситет ротора неподвижен относительно поверхности статора симметричное магнитное поле в круговом кольце плоскости t будет вращаться, а функция $f(z) = \frac{dt}{dz}$, связывающая значения индукции в плоскостях t и z , остаётся неподвижной. В результате магнитное поле в полюсах (магнитах) и ярме ротора начнёт пульсировать, причем суммарный переменный магнитный поток, замыкающийся вокруг вала ротора, будет отличен от нуля. В этом случае, как известно [5], вдоль вала наводиться ЭДС и протекает переменный ток, замыкающийся через подшипники, подшипниковые щиты и корпус статора. В результате может наблюдаться нагрев подшипников, сопровождающийся электрохимической эрозией.

Из изложенного следует, что превышение допустимых значений несоосности ротора вентильного двигателя может быть обнаружено путем контроля напряжения на зажимах двигателя, потребляемого тока и температуры.

Алгоритмы исследования рассмотренных математических моделей должны быть реализованы в прикладном программном обеспечении SCADA-системы. Следует учитывать, что несимметрия и несинусоидальность фазных токов и напряжений, сопровождающиеся повышением температуры, могут быть вызваны и разными причинами. Они лишь могут свидетельствовать о возникновении неисправности. Для уточнения характера дефекта можно рекомендовать провести диагностику электрических машин с использованием спектрального анализа сигнала тока [6-8]. Специализированные программно – аппаратные комплексы позволяют с высокой степенью достоверности определять состояние элементов двигателя.

Выводы

1. При межвитковых замыканиях в обмотке статора большие амплитуды имеют токи фаз, в которых нет короткозамкнутых витков. Фазные напряжения обмоток статора несинусоидальны, в большей степени это наблюдается в бездефектных фазах, имеет место смещение нейтрали обмотки статора. Токи замкнутого контура оказывают размагничивающее действие на магнитный поток в воздушном зазоре, что приводит к росту

электрической частоты вращения двигателя, электромагнитный момент становится меньше.

2. Несоосность ротора, связанная с вращательным движением эксцентриситета, вызывает несинусоидальность ЭДС холостого хода и пульсации электромагнитного момента с частотой в $3p$ раз превышающую частоту вращения ротора. При неподвижном положении эксцентриситета наводится переменная ЭДС вдоль вала ротора, вызывающая переменный ток в контуре: вал-подшипники-подшипниковые щиты-корпус статора.

3. Алгоритмы исследования рассмотренных математических моделей должны быть реализованы в прикладном программном обеспечении SCADA-системы. Для уточнения характера дефекта можно рекомендовать спектральный анализ сигнала тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев А.А. Математическое моделирование электромеханических систем. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – 274 с.

2. Двигатели вентиляльные серии 6ДВМ. Основные технические характеристики URL: <https://www.cheaz.ru/assets/images/production/10-ensber/1-electrodvig/2-6-dvm/6dvm.pdf> (дата обращения: 29.10.2021).

3. Коппенфельс В., Штальман Ф. Практика конформных отображений: пер. с нем. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 407 с.

4. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В. Применение конформного преобразования в электромашинных расчетах электрических машин. Аналитические методы. М.: Типография МЭИ, 1980. – 85 с.

5. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. Л.: Энергия, 1967. – 344 с.

6. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives fundamentals, data interpretation, and industrial case histories/ by William T. Thomson Director and Consultant EMD iagnostics Ltd. Alford, Aberdeenshire, Scotland and Ronald J. Gilmore Discipline Technical Authority (Electrical Engineering) AMECU pstream Oil&Gas Nigg, Aberdeen, Scotland. URL: <http://docplayer.net/21734312-Motor-current-signature-analysis-to-detect-faults-in-induction-motor-drives-fundamentals-data-interpretation-and-industrial-case-histories.html> (дата обращения: 29.10.2021).

7. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока. URL: <http://mcsa.electrik.org/el1.html> (дата обращения: 29.10.2021).

8. Ряполов П.А., Рыженко В.В. Диагностика асинхронных электродвигателей на основе спектрального анализа тока статора URL: <http://www.cs-alternativa.ru/text/2104> (дата обращения: 29.10.2021).

Авторы:

Афанасьев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах. Закончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 году. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 г. E-mail: afan39@mail.ru.

Генин Валерий Семенович, доктор технических наук, доцент, профессор, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах. Закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1976 году. Докторскую диссертацию «Методы и технические средства управления, контроля и испытаний электротехнического и технологического оборудования нефтегазодобывающих предприятий» защитил в МЭИ в 2008 году. E-mail: v.s.genin@mail.ru.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. Закончила математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2000 году. Защитил диссертацию по специальности 13.00.02 Теория и методика обучения и воспитания в 2015 году. E-mail: oln2404@mail.ru.

Спирidonova Анастасия Сергеевна, студент 1 курса магистратуры факультета радиоэлектроники и автоматики. E-mail: nastyusha-kurbatova@mail.ru.

Шарафудинов Нияз Рефисович, студент 1 курса магистратуры факультета радиоэлектроники и автоматики. E-mail: Niyazshar1999@mail.ru.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ ПО ОПЕРАТИВНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМ

Петров Д.А., Позин Д.О., кафедра электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

***Аннотация.** В работе описывается результат обработки имеющихся достижений в области виртуальной, дополненной и смешанной реальности при разработке тренажеров оперативно-диспетчерских переключений. Данные технологии могут применяться для повышения квалификации сотрудников, занимающихся техническими системами относительно электроснабжения промышленных предприятий. Осуществлен анализ существующих видов тренажеров в области электроэнергетики, на основании которого создана их структура и классификация, что улучшит понимание данной технологии и её необходимости в целом, и послужат вектором развития и внедрения в обучение.*

***Ключевые слова:** виртуальная реальность, 3D-тренажер, симулятор, моделирование, электроэнергетика*

Краткая история развития технологий в области виртуальной реальности

Любые знания необходимо реализовывать на практике, но допуск неопытного хоть и квалифицированного работника на объект может повлечь неблагоприятные последствия даже под присмотром более опытного наставника. Для этого необходима определённая практика освоенного материала, но не на реальных объектах, дабы избежать разного рода ущерба.

В этих целях развивалось такое направление в области обучение будущих рабочих как тренажеры, которые должны были отобразить не только их знания, но фактические применения их навыков пускай и не на реальном объекте.

Одни из первых проектов по созданию продукта, позволяющего отработать необходимые навыки, упоминается в 99 году 20 века. Так, в статье двух доцентов кафедры информационных технологий Э. Арройо и Дж. Аркос из Самудио, Испания говорится о системе виртуальной реальности. Система состоит из симулятора предприятия, который в настоящее время использу-

ется компанией в процессе обучения операторов выполнению локальных маневров [1]. Уже в прошлом столетии прибегали к обучению персонала при помощи виртуальной реальности. Одним из основных выводов, полученных на основе этого прототипа, была демонстрация возможности разработки системы обучения в виртуальной реальности. Подобных приложений, в основу которых пошли реальные объекты достаточно много.

Но это только первые шаги, которые основаны на реальной модели. Поэтому чтобы данное направление было более универсальным оно развивалось. Так, на международной конференции в Китае, которая состоялась в 2010 в своих трудах Чжэнвэй Чанг, Ю Фанг и Юнь Чжан об системе обучающего моделирования для обслуживания оборудования подстанции представлена обучающая симуляционная система для обслуживания оборудования подстанции. Представленная система моделирования окажет значительное влияние на развитие технологий технического обслуживания и обучение персонала энергокомпании [2].

В следующей работе о разработке и применение платформы для обучения навыкам электроэнергетике на основе технологии виртуальной реальности авторы Шиюнь Чжан и Суинь Инь на Китайском конгрессе поясняют насколько развитие данной технологии повлияло на общие изменения и в сфере обучения. Новый метод обучения в виртуальной реальности имеет определённые преимущества по сравнению с традиционным. Обучаемые получают возможность иметь точное восприятие различных объектов в виртуальной среде через органы чувств, что полезно для повышения фактического уровня работы обучаемых, а также снижения затрат на обучение [3].

Всё это говорит о значимости данной технологии и необходимости совершенствования до абсолютного идеала.

В результате развития данной технологии на свет было произведено много разного рода продукта в области виртуальной реальности, затрагивающего многие сферы жизни деятельности человека, одними из которых являются работа с электроустановками.

Полноценный продукт, который может послужить явным примером в области энергоснабжения это – «Программа - 3D тренажер для обучения электротехнического персонала опера-

тивными переключениям на открытых распределительных устройствах напряжением 10-1150 кВ» за авторством Иванова А.А., Какаулов С.В. и Суворова И.Ф. Их программа предназначена для обучения электротехнического персонала оперативным переключениям на открытых распределительных устройствах. Все действия обучающегося записываются, на основании чего можно дать оценку его действиям [4]. Данный опыт в подобном роде программы очень благоприятно сказывается на способностях будущего персонала.

Резюмируя историю развития этой технологии длительностью около трети столетия, можно сослаться на работу старшего научного сотрудника Института проблем управления РАН А.И. Разумовского о практике создания 3D-тренажеров. Их главная мысль заключается в том, что когда конечной целью является формируемый навык взаимодействия человека и специфического окружения, имеется лишь один способ быстрой и качественной выработки подобного навыка – использование виртуального 3D-тренажера. Он способен осуществить комплексное восприятие предоставленного окружения [5].

Развитие технологий облегчает жизнь людей, улучшая все аспекты жизни человека, поэтому дальнейшее развитие виртуальной реальности, учитывая на сколько оно сильно развилось за последние 10 лет, неизбежно и даже необходимо для минимизации негативных моментов абсолютно во всех сферах жизни человека и в частности энергоснабжения промышленных предприятий.

Существующие тренажеры

Для анализа рассмотрим аналогичные проекты по всему миру. Так, на основании имеющихся публикаций можно выделить 3 группы по общим признакам.

- 1) Моделирование виртуальной среды:
 - в статьях [6,7] представлен виртуальный симулятор подстанции.
- 2) Оперативно - диспетчерские переключения:
 - в работе [4] реализован полноценный проект РУ для обучения электротехнического персонала;

- в статье [8] для диспетчера, направленный на оттачивание навыков быстрогодействия и умения быстро принять решение.
- 3) Симбиоз учебного пособия и 3D VR симуляция:
- в статье [9] представлено обучение оперативного персонала для решения противоаварийных тренировок;
 - в работе [10] реализован учебная модель с использованием модификации 3D.

На основании рассмотренных публикаций можно свести в таблицу классификацию по данному направлению.

Таблица 1

Разновидности тренажёров,
полученных за последние 20 лет развития технологий

Основные виды и их подвиды	Основанные на реальных объектах	Широкого направления	Аркадного стиля	Описания действий	Компании по производству специализированного ПО
VR	+	+	-	-	+
ПО старого поколения	+	-	+	+	-
Тренажерный комплекс	+	+	-	-	+

Вывод

ПО старого поколения являются пережитком прошлого и не могут предоставить необходимый функционал для развития навыков и умения работать с электроустановками.

На смену имеющимся технологиям пришла виртуальная реальность, которая строго специализирован на повседневных и чрезвычайных ситуациях, выгодно отличается как проработанными алгоритмами оперативных переключений, так и детализацией электроустановки. Чей потенциал дальнейшего развития обеспечит рост уровня квалификации рабочего персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Мохсен, Н.М. Эль-Макки и Н.Ганем, «Идентификация авторов с помощью глубокого обучения», *15-я Международная конфере-*

ренция IEEE по машинному обучению и приложениям (ICMLA) , 2016 г., стр. 898-903, doi: 10.1109 / ICMLA.2016.0161.

2. З. Чанг, Ю. Фанг, Я. Чжан и К. Ху, «Система обучающего моделирования для обслуживания оборудования подстанции», *Международная конференция 2010 г. по машинному зрению и человеко-машинному интерфейсу* , 2010 г., стр. 572-575, DOI: 10.1109 / MVNI.2010.31.

3. С. Чжан и др ., «Разработка и применение платформы для обучения навыкам работы в электроэнергетике на основе технологии виртуальной реальности», *Китайский конгресс по автоматизации (CAC)* , 2018 г., стр. 1548-1551, DOI: 10.1109 / CAC.2018.8623508.

4. С. Чжан и др ., «Разработка и применение платформы для обучения навыкам работы в электроэнергетике на основе технологии виртуальной реальности», *Китайский конгресс по автоматизации (CAC)* , 2018 г., стр. 1548-1551, DOI: 10.1109 / CAC.2018.8623508.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615239 Российская Федерация. Программа - 3D тренажер для обучения электротехнического персонала оперативным переключениям на открытых распределительных устройствах напряжением 10-1150 кВ; № 2020613952: заявл. 09.04.2020: опубл. 19.05.2020 / А.А. Иванов, С.В. Какаунов, И.Ф. Суворов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»).

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612005 Российская Федерация. Тренажерный комплекс обучения электротехнического персонала «Тренажер ЗРУ 6 (10) кВ»; № 2018662488: заявл. 08.11.2018: опубл. 07.02.2019 / Д.И. Шевченко, А.А. Кудрявцев; Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «Автоматизация Технологических Процессов».

7. У. Ван и Г. Ли, «Виртуальная реальность в тренажере подстанции», 14-я Международная конференция 2010 г. по совместной работе с компьютерами в проектировании , 2010 г., стр. 438-443.

8. М. Сурьяман, Ю. Сараги, Е.С. Агата, К. Чи Минг, Н.Т. Нху Ван и А. Азиз Хафил, «Настройка сертифицированного электротехника для электростанции: разработка учебной модели с использованием модификации 3D-симулятора VR для профессионального инженера. Университета Сингапербангса Караванг, 3-я Международная конференция по механике, электронике, компьютерам и промышленным технологиям 2020 г. (MEChIT) , 2020 г., стр. 267-270.

9. Ромакин В.А., Разумовский А.И., Балабанов А.В. Создание графических учебных пособий и 3D-тренажеров // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 4. С. 65 - 70.

10. М. Сурьяман, Ю. Сараги, Е.С. Агата, К. Чи Минг, Н.Т. Нху Ван и А. Азиз Хафил, «Настройка сертифицированного электротехника для электростанции: разработка учебной модели с использованием модификации 3D-симулятора VR для профессионального инженера. Университета Сингапербангса Караванг, 3-я Международная конференция по механике, электронике, компьютерам и промышленным технологиям 2020 г. (MECnIT), 2020 г., стр. 267-270.

Авторы:

Петров Дмитрий Александрович, студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, ИЭиАС МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: dnngmstrs@gmail.com.

Позин Данил Олегович, студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова, ИЭиАС МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: pozindanila@gmail.com.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБОВ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Орлов М.Е., Хисаметдинова А.Ш., Халиуллов Д.С., УлГТУ, г. Ульяновск, Россия

Аннотация. Рассмотрены существующие способы сжигания твердого топлива, среди которых четыре традиционных: слоевое, сжигание в циркулирующем кипящем слое, факельное, вихревое. Опыт работы и мировая практика показывают, что сжигание твердого топлива может быть на порядок эффективнее за счёт использования новых технологий, таких как сжигание в электрическом поле с помощью катализатора или получение и сжигание водоугольного топлива. В результате исследований предложен новый способ сжигания твердого пылеугольного топлива с помощью устройства температурной стратификации, позволяющий улучшить экономические и экологические характеристики теплоэнергетических установок.

Ключевые слова: твердоугольное топливо, сжигание в электрическом поле, водоугольное топливо, устройство температурной стратификации.

Традиционные способы сжигания твердого топлива

В последнее время в мире наблюдается тенденция к росту потребления твердого топлива в котельных агрегатах. В связи с этим перед современной наукой и техникой стоят сложные задачи, связанные с созданием для электростанций очень крупных агрегатов, рассчитанных на экономичное сжигание твердого органического топлива, что невозможно без оптимизации устройств для сжигания топлива и интенсификации процессов горения. В этой сфере необходим поиск новых рациональных решений, способов и технологий, направленных на повышение эффективности процесса сжигания, позволяющих при этом минимизировать выбросы в атмосферу вредных веществ и повысить КПД топливосжигающих установок.

Выделяют четыре традиционных способа сжигания твердого топлива: слоевой; в кипящем или псевдоожиженном слое; факельный; циклонный (вихревой).

Слоевое сжигание топлива – самый древний способ сжигания твердого топлива. Как правило, применяется для сжигания кускового топлива в слое на колосниковой решетке, через которую подается необходимый для горения воздух.

В современной мировой теплоэнергетике существует тенденция более широкого внедрения технологий сжигания твердого топлива в кипящем слое (КС). Слой, в котором происходит сжигание, также может называться псевдоожиженным. С появлением котлов с циркулирующим кипящим слоем при упоминании традиционного КС часто используется прилагательное «стационарный». В зависимости от получаемой температуры слоя в котле сжигание в КС подразделяется на низкотемпературное и высокотемпературное.

Сжигание в циркулирующем кипящем слое схоже со сжиганием в стационарном кипящем слое. Отличительной чертой котлов с ЦКС является наличие устройств для улавливания золы и систем возврата материала в топку. Эффективность работы именно этих устройств оказывает определяющее влияние на большинство показателей котла. С этим связана важность наличия определенного количества циркулирующих частиц, которые могут улавливаться из топки и возвращаться в слой.

Факельное сжигание топлива также может считаться высокотехнологичным способом. Его реализуют в камере, в которую специальными пылевыми горелками подается смесь воздуха с предварительно измельченным в пыль топливом (в основном используется уголь). Большое значение для работы пылеугольных топок имеет конструкция применяемых горелок. Горелки должны обеспечивать хорошее перемешивание топлива с воздухом, надежное зажигание аэросмеси, максимальное заполнение факелом топочной камеры и легко поддаваться регулированию по производительности в заданных пределах.

Вихревое сжигание является одним из самых технологичных способов. Как правило, этот способ применяется для сжигания мелкофракционного и пылевидного топлива. При его реализации большая часть топлива не находится на колосниковой решетке, а вращается в вихревом (спиральном) потоке дутьевого воздуха.

Современные технологии сжигания твердого топлива

Требования по достижению современных экологических показателей для ТЭС создают необходимость в разработке новых конструкций топочно-горелочных устройств. Опыт работ и мировая практика показывают, что сжигание твёрдого топлива может быть на порядок эффективнее за счёт использования новых технологий [2].

К более современным способам сжигания твердого топлива относится сжигание в электрическом поле с помощью катализатора, находящегося в зоне горения и на который подается высокое напряжение, что приводит к снижению энергий активации всех эндотермических стадий реакций горения за счет образования атомов кислорода, радикалов углерода и кислородосодержащих радикалов. Такой способ приводит к снижению энергий активации всех стадий реакций горения за счет образования атомов кислорода, радикалов углерода и кислородосодержащих радикалов, за счет чего происходит экономия топлива, более полное выгорание твердого топлива и увеличение коэффициента полезного действия процесса горения.

Другим современным способом является получение и сжигание водоугольного топлива (ВУТ). ВУТ представляет собой

смесь угля, воды и пластификатора. В наши дни ВУТ получает все более широкое распространение на теплоэнергетических предприятиях как альтернатива другим традиционным видам органического топлива. Возникающие при сжигании угля в чистом виде консервативными методами трудности, обратили свое внимание на развитие и усовершенствование технологии производства и сжигания ВУТ, использование которого имеет экологические, технологические и экономические преимущества [4].

Водоугольное топливо представляется дискретным набором капель, которые подаются в топочную камеру. Эти капли состоят из комплекса уголь плюс вода (внешняя влага). На первом этапе происходит испарение внешней влаги. Изменение массы капли (внешней влаги) в процессе испарения описывается следующим уравнением

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi D_p \left[\rho_C D_C^b Sh_C \ln(1 + B_M) \right], \quad (1)$$

или изменение диаметра по формуле:

$$\frac{dD_p^2}{dt} = \frac{4}{\rho_p} \left[\rho_C D_C^b Sh_C \ln(1 + B_M) \right], \quad (2)$$

где B_M – коэффициент Сполдинга для массоотдачи; Sh_C – число Шервуда:

$$Sh_C = 2 + 0.6 Re^{0.5} Sc_m^{0.333}, \quad (3)$$

где Sc_m – молекулярное число Шмидта.

Коэффициент Сполдинга B_M для массоотдачи может быть найден по формуле:

$$B_M = \frac{f_{VS} - f_V}{1 - f_{VS}}, \quad (4)$$

где f_{VS} , – массовая доля пара в среде в условиях, когда пар – насыщенный.

После испарения влаги остаются угольные частицы. Далее происходит выгорание обычной частицы [1].

Котельные установки возможно адаптировать для сжигания водоугольного топлива двумя основными способами: кардинальная реконструкция и модернизация существующих котельных агрегатов различной степени мощности.

Сжигание твердого топлива с помощью устройства температурной стратификации

В результате исследования существующих способов сжигания, авторами разработан новый способ сжигания твердого топлива с помощью устройства температурной стратификации. Суть этого устройства заключается в том, что при подаче на вход устройства смеси пылевидного топлива, на выходе получается два потока, один из которых будет нагретым, а другой – холодным.

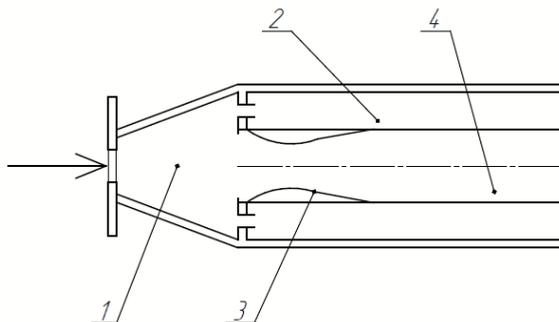


Рис. 1. Схема устройства температурной стратификации
1 – камера смешения, 2 – дозвуковой канал, 3 – сужающее устройство, 4 – сверхзвуковой канал

Термически однородный поток поступает во входную камеру, механически делится на части с помощью разделительной стенки, при этом первая часть поступает в тракт, а вторая – через сужающее устройство в тракт, который является сверхзвуковым. В сверхзвуковом тракте пылевоздушная смесь нагревается за счет повышения скорости при прохождении через сужающее устройство. На выходе из устройства температурной стратификации получаются два потока: холодный и нагретый.

В Ульяновском государственном техническом университете проводятся исследования и разработки технологии и техники

повышения эффективности температурной стратификации за счет использования дисперсного рабочего тела (в нашем случае это пылевоздушная смесь).

Повышение эффективности температурной стратификации в дисперсном потоке обусловлено тем, что в нем в условиях направленного поперечного перемещения частиц в пограничном слое имеет место существенная интенсификация теплоотдачи, а в сверхзвуковом потоке такая интенсификация сопровождается уменьшением коэффициента восстановления температуры.

В теплоэнергетической установке устройство температурной стратификации устанавливается перед горелкой, подключенной к циклонной топке. Нагретый поток подается в горелку, а холодный – в канал для подачи вторичного воздуха. В результате повышается начальная температура горения нагретого потока, а понижение температуры вторичного воздуха приводит к образованию в топке вихря, обеспечивающего условия для многократной циркуляции частиц топлива в вихревом потоке, и к снижению температуры в зоне активного горения, способствующему уменьшению образования оксидов азота в уходящих газах.

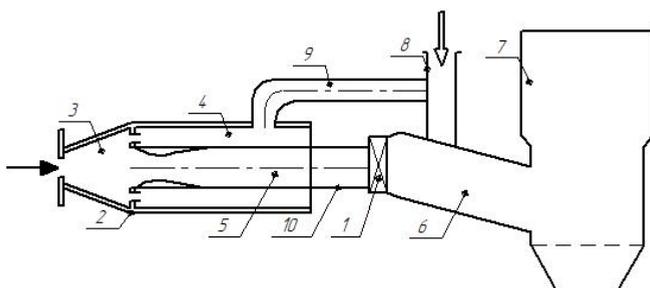


Рис. 2. Способ сжигания твердого топлива:

- 1 – горелка, 2 – устройство температурной стратификации
- камера смешения, 4 – дозвуковой канал, 5 – сверхзвуковой канал,
- 6 – предтопок, 7 – топка, 8 – патрубок для подачи вторичного воздуха,
- 9 – трубопровод для подвода холодного потока,
- 10 – трубопровод для подвода нагретого потока

Предполагается, что разделение в устройстве температурной стратификации потока пылевидного топлива с первичным

воздухом на нагретый и охлажденный потоки позволяет повысить начальную температуру горения нагретого потока. А понижение температуры вторичного воздуха за счет смешения его с охлажденным потоком и подача полученной смеси в предтопок приводит к образованию вихря, который будет обеспечивать условия для многократной циркуляции частиц топлива в вихревом потоке и понижение температуры в зоне активного горения, которое способствует снижению образования оксидов азота.

Выводы

Таким образом, сделав обзор существующих способов и технологий сжигания твердого топлива, таких как вихревое сжигание, сжигание в электрическом поле, замена обычного топлива водоугольным, был предложен новый способ сжигания топлива с помощью устройства температурной стратификации, который позволяет повысить экономические и экологические характеристики за счет снижения затрат теплоты на подогрев первичного воздуха, уменьшения механического недожога и снижения шлакообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов, Е. А. Топливо и теория горения. Раздел – подготовка и сжигание топлива: Учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Е.А. Блинов. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 119 с.
2. Бирюков А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учебное пособие / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2014. – 232 с.
3. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках / М.Н. Башкова, С.А. Казимиров, М.В. Темлянцев, В.И. Багрянцев, А.А. Рыбушкин, К.С. Слажнева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 2(8). – с. 24–32.
4. Богатырёва, Л.Ю. Водоугольное топливо как рациональное использование природных ресурсов / Л.Ю. Богатырёва, Н.Д. Андрийчук // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018): сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Под ред. А.Н. Яковлева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 58-59.

Авторы:

Орлов Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент строительного факультета УлГТУ. Закончил УлГТУ в 1999 году. В 2002 году защитил диссертацию по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». E-mail: mi5h@mail.ru.

Хисаметдинова Альфия Шамильевна, студент строительного факультета УлГТУ. E-mail: al.hisametdinova@mail.ru.

Халиуллов Динар Салаватович, аспирант энергетического факультета УлГТУ. E-mail: dired073@gmail.com.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИ-АГЕНТНОЙ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А., Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Рен Д., Хайнаньский университет, г. Хайкоу, Китай

***Аннотация.** В работе предлагаются подход и алгоритм к решению задачи комплексного оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы. Введено унифицированное определение агентов, применимое к классу динамических систем, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей. Предложенная схема решения задачи оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы является основой для оптимизации её работы в режиме реального времени. В качестве типовых критериев эффективности рассмотрены критерии технической, экономической и экологической эффективности.*

***Ключевые слова:** эффективность микроэнергосистемы, мультиагентная система, многокритериальная оптимизация, микрогрид, возобновляемые источники энергии.*

Вопрос проектирования высокоэффективных локальных энергосистем, в том числе включающих нетрадиционные источники энергии, такие как разнотипные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и различные накопители энергии, является актуальным в последние годы, особенно при рассмотрении совокупности технических, экономических и экологических показателей функционирования. При этом повышение эффективно-

сти подобных систем связано как с функционированием микроэнергосистемы в целом, так и её отдельных субъектов.

Микроэнергосистеме [1] как объекту управления присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом микрогрид должна обеспечивать надёжное снабжение потребителей при условии полного отделения от распределительной электрической сети, т. е. в изолированном режиме. В рамках указанных микроэнергосистем различные субъекты системы активно взаимодействуют в реальном времени в процессе функционирования единой технологически объединенной системы.

Мульти-агентное представление микроэнергосистемы

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии разнородных и противоречивых критериев, а также неравновесным распределением критериев между существенно различающимися субъектами динамической системы можно связать с мульти-агентным представлением исходной системы. Мульти-агентная (МАС) форма представления многокомпонентных динамических систем находит все большее применение, в том числе для исследования микроэнергосистем [2], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надежность, реконфигурируемость и т. п. Следовательно, предложенный в работе подход к оцениванию эффективности микроэнергосистемы основан на мульти-агентном представлении рассматриваемой системы.

В таблице приведен перечень агентов, отражающих основные субъекты рассматриваемой в работе микроэнергосистемы. Следует отметить, что перечень может быть расширен согласно конкретно рассматриваемой системе. Например, в ряде случаев может быть необходимо учитывать инвертеры в качестве отдельного субъекта системы и т.д.

Рассмотрим целевые функции (ЦФ), принятые в данной работе и соответствующие основным критериям эффективности функционирования микроэнергосистемы, сформулированным с учётом нормативной документации и накопленного опыта экспертов.

Таблица

Формализованные агенты и их функциональность
в составе МАС-микрогрид

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микрогрид, агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микрогрид; $F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии; $F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ – стабилизация частоты в микрогрид; $F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости микрогрид	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС
		6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Система накопления энергии (СНЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости микрогрид
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микрогрид электроснабжение, $F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микрогрид во внешнюю электросеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ – целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ – сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микрогрид

Формулировка критериев и целевых функций эффективности функционирования микроэнергосистемы

В соответствии с введенным обобщенным определением микроэнергосистемы и на основании экспертных оценок [3], и обзора публикаций, сформулируем вводимые в рассмотрение критерии технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы:

1. Техническая эффективность Y_T^{SYS} . Под данным критерием рассматриваются надёжность процесса электроснабжения, отклонение режима процесса генерации, отклонение от ожидаемой доли энергии, и произведённой из возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Надёжность процесса электроснабжения в микроэнергосистеме оценивается с использованием нормативно-установленных показателей надёжности.

2. Экономическая эффективность $Y_{ЭЭ}^{SYS}$. Критерий экономической эффективности формируется из четырёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии C^{EN} , цена для потребителя PR , прибыль владельца микроэнергосистемы REV , и также отклонение режима процесса генерации ΔP^{Total} .

3. Экологическая эффективность $Y_{ЭКО}^{SYS}$. Экологическую эффективность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением отклонения от ожидаемой доли энергии, произведённой ВИЭ, и выброса парниковых газов (CO_2 , NOX и др.).

Алгоритм решения задачи оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы

Решение задачи оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы предлагается разбить на несколько этапов, как это представлено на рис. 1.

На этапе 1 решается задача выбора таких моделей описания агентов MO^{Ai} , которые адекватно соответствуют исследуемым ЦФ и отвечают ограничениям по точности ε_i и информативности Θ_i , как это показывает следующая логическая конструкция (логическая формула):

$$MO^{Ai} \begin{matrix} \varepsilon_i \\ \leftrightarrow y_j^{SYS} \\ \Theta_i \end{matrix} . \quad (1)$$

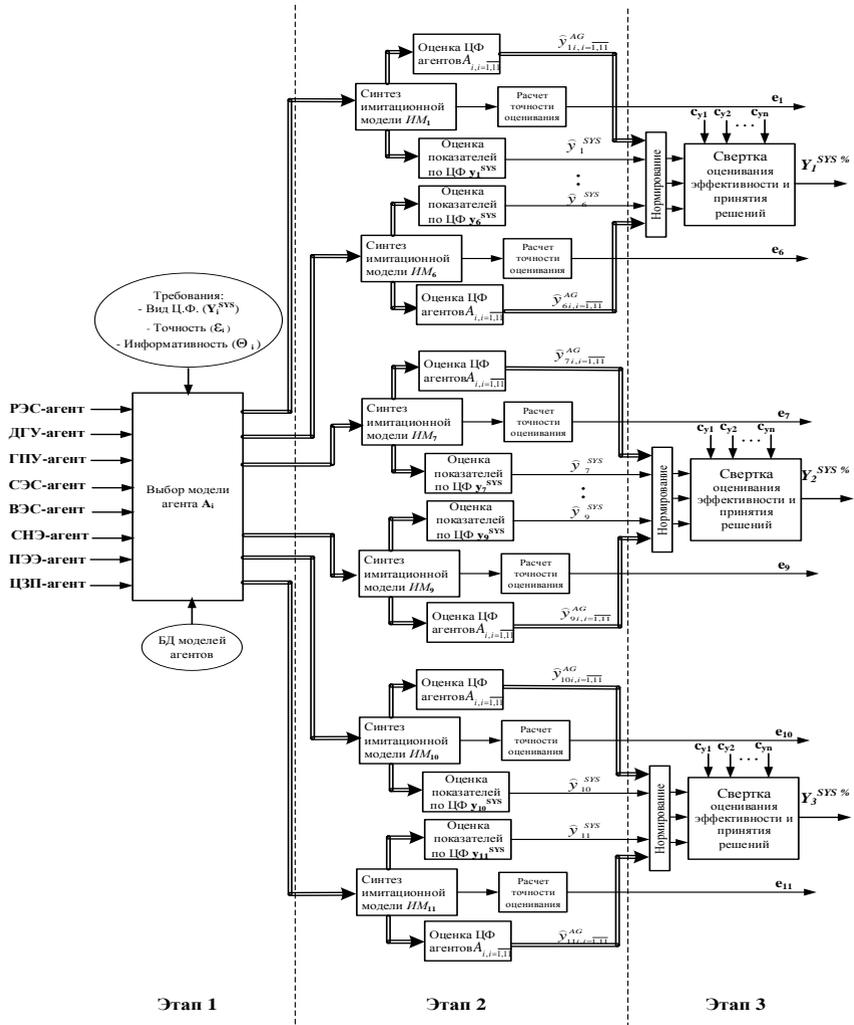


Рис. 1. Схема решения задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы:

РЭС-агент – распределительная электрическая сеть; ДГУ-агент – дизель-генераторная установка; ГПУ-агент – газопоршневая установка; СЭС-агент – солнечная электростанция; ВЭС-агент – ветровая электростанция; СНЭ-агент – система накопления энергии; ПЭЭ-агент – спрос потребителя; ЦЭП-агент – спрос ценозависимого потребителя; ϵ_i – точность модели агента A_i ; Θ_i – информативность модели агента A_i ; e_k – погрешность расчета целевой функции y_k^{SYS} ; c_{yk} – весовой коэффициент целевой функции y_k^{SYS} ; ИМ – имитационная модель; БД – база данных.

В формуле (1) MO^{Ai} – модель описания агента A_i ; \leftrightarrow – знак соответствия; ϵ_i – точность модели агента A_i ; Θ_i – информативность модели агента A_i . Т.е. каждой модели ставится в соответствие определенный критерий, представляющий набор ЦФ. При наложенных ограничениях на точность и информативность МО.

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ из вышеприведенных групп критериев. Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчетом точности оценивания e_j , что является важной выходной информацией.

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все три предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчет оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом Y_k^{SYS} , $k = 1 \dots 3$, а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG} .

Выводы

Сформулирована постановка задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы с учётом её мультиагентного представления. Сформулированы три критерия оценки технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы как сгруппированные совокупности из формализованных целевых функций.

Разработан комплекс моделей по решению задачи оценивания технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы в мультиагентном представлении. Суть состоит в сведении оценки эффективности функционирования микрогрид к анализу процессов, протекающих на уровне каждого агента, а затем к исследованию обобщённой модели микроэнергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Marnay C.* Microgrid Evolution Roadmap / C. Marnay, S. Chatzivassileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella, Jan

von Appen // in: 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015. – Pp. 139-144.

2. *Абд Эльрахим А.К.* Описание агентов при решении задач анализа микрогрид на основе мультиагентного подхода / Амин К. Абд Эльрахим, В. А. Шихин // Сборник материалов XI Всероссийской научно-технической конференции. – Издательство Чувашского университета, 2018. – С. 122-124.

3. *Olivares D.* Trends in microgrid control / D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez, N. D. Hatziargyriou // IEEE Transactions on Smart Grid, vol.5 , no.4, Jul.2014. – Pp. 1905-1919.

Авторы:

Абд Эльрахим Амин Камаль, аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ МЭИ. E-mail: aminkamal90@hotmail.com.

Шихин Владимир Анатольевич, к.т.н. доцент кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ МЭИ. E-mail: ShikhinVA@mpei.ru.

Рен Джа, PhD, профессор кафедры информационных технологий Хайнаньского университета, г. Хайкоу, Китай. E-mail: 74034912@qq.com.

У. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРО-ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ

Колесник М.Б., Иванов С.Н., Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. Произведён статический анализ на прочность асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента с помощью подключаемого модуля *SolidWorks Simulation*. Произведён непосредственный анализ полученного результата напряжённо-деформированного состояния двигателя. Сделаны выводы о его пригодности к работе с осевыми нагрузками. Определены основные направления последующих исследований асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние, *SolidWorks Simulation*, статический анализ, напряжения.

Введение

Электрический привод (ЭП) играет большую роль в реализации задач повышения производительности труда в разных отраслях народного хозяйства, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. В статье рассматривается возможность применения электропривода на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента, конструктивное исполнение и принцип действия которого описаны в [1-2]. Применение такого типа ЭП может найти широкое применение на железной дороге, в авиастроении, строительстве, сельском хозяйстве и др.

Анализ конструкции электропривода на основе асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного

элемента показал, что используемое в нём сопряжение типа «винт-гайка» является наиболее слабым звеном привода, и для выбора размерных соотношений передаточных элементов была разработана методика, основу которой составили технические и эксплуатационные характеристики электромеханических преобразователей [3]. При этом определяющим критерием выбора размерных соотношений задаётся механическая устойчивость с учётом всех воздействующих усилий.

Основной задачей, решаемой в данной статье, являлось определение возможности использования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при работе с осевыми нагрузками путём проведения анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов в пакете SolidWorks Simulation.

Обоснование выбора программы

Среди существующих пакетов программ, позволяющих производить расчёты на прочность и тепловые расчёты, следует отметить программные пакеты MSC Nastran, Ansys и SolidWorks. После обзора данных программ был сделан выбор в пользу пакета SolidWorks Simulation. Основными достоинствами программы являются удобный интерфейс, позволяющий быстро её освоить, наличие русскоязычной версии, автоматическое и ручное создание конечного элемента сеток (трёх- и шестиузловые треугольники, четырёх- и десятиузловые тетраэдры), а её модели могут быть легко интегрированы в CAD/CAM/CAE-системы различных уровней [4].

Объект исследования

Для проведения исследования в программе SolidWorks была создана модель, соответствующая типовому асинхронному двигателю. Для осуществления операций по линейному перемещению модель была конструктивно модифицирована – в роторе предусмотрено технологическое отверстие, в котором нарезана трапецидальная резьба для последующей установки исполнительного элемента (тяги). Конструктивное исполнение модифицированного двигателя представлено на рис. 1.

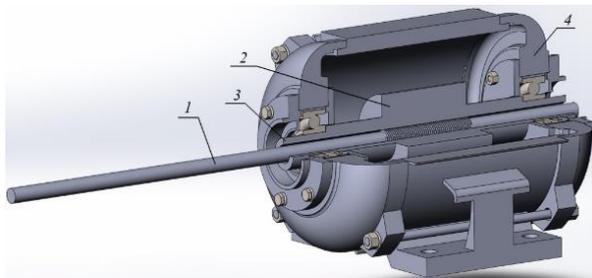


Рис. 1. Конструкция двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента: 1 – исполнительный элемент (тяга); 2 – ротор; 3 – втулка ротора; 4 – корпус двигателя

Статический анализ

Конструктивно двигатель представляет собой сложный механизм, и для того, чтобы оценить его способность выдерживать осевые нагрузки, необходимо учесть много внутренних и внешних факторов, поэтому для повышения эффективности получения результата задача была разделена на два этапа:

1. Анализ передаточного механизма, который конструктивно представляет собой втулку ротора и тягу с нарезанной на их внутренней и внешней стороне соответственно трапецеидальной резьбой.

2. Статический анализ корпуса двигателя.

Для проведения статического анализа конструкциям на обоих этапах были заданы закрепления, определяющие их степени свободы, соответствующие данной задаче, и приложены внешние нагрузки в виде вращающего момента или силы.

Результат первого этапа исследования представлен на рис. 2. В данном случае вращающий момент приложен к втулке ротора и равномерно распределён по ней.

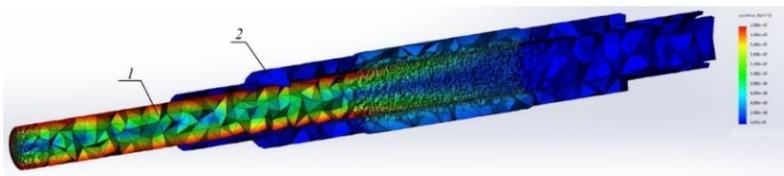


Рис. 2. Статический анализ передаточного механизма типа «винт-гайка»: 1 – исполнительный элемент (тяга); 2 – втулка ротора

Анализ результатов показал, что наиболее нагруженной частью является исполнительный элемент. На рис. 3 видно, что нагрузка по виткам резьбы распределяется неравномерно и основная нагрузка приложена к первой половине витков, там же и возникают наибольшие напряжения во всей конструкции. На рис. 4 крупным планом показано распределение нагрузки на первых витках резьбового соединения [5].

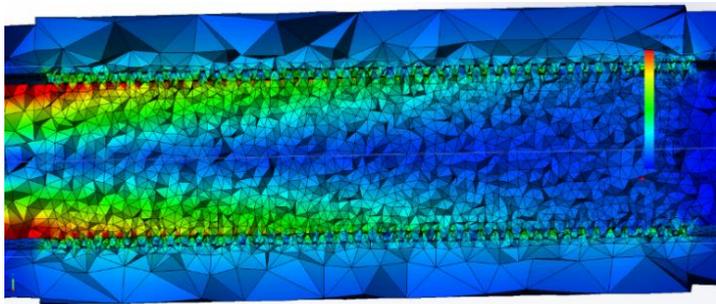


Рис. 3. Витковая область

Результаты второго этапа исследования представлены на рис. 5 и 6. В данном случае внешняя нагрузка приложена к правому (рис. 5) подшипнику в виде равномерно распределённой силы. Её величина была определена из эпюры напряжений первого исследования. По рис. 5 и 6 следует отметить, что большие напряжения проявляются в местах затяжки болтовых соединений, а также на лапах, в местах крепления к корпусу двигателя (рис. 5 – слева, рис. 6 – справа), это связано с возникновением момента между областью крепления лап к корпусу и местом приложения силы [6].

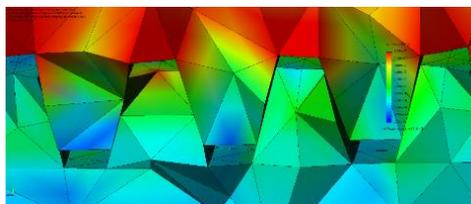


Рис. 4. Нагрузка в зубцах

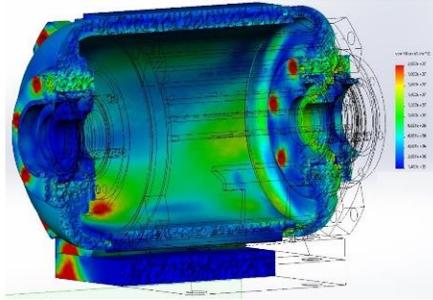


Рис. 5. Результаты статического анализа корпуса в разрезе

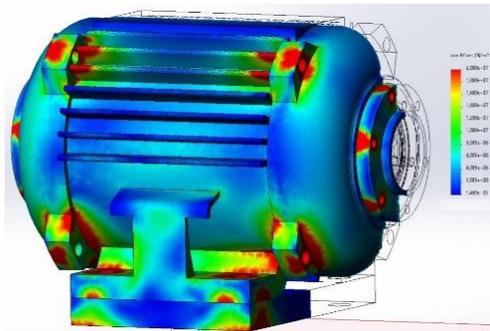


Рис. 6. Результаты статического анализа корпуса двигателя, вид снаружи

Выводы

Проведённые вычислительные эксперименты показали, что стандартный двигатель может выдерживать осевые нагрузки, но запас прочности по всей конструкции различный, в частности, максимальный запас прочности у корпуса двигателя, существенно меньший – у передаточного механизма. Для обеспечения принципа равнопрочности и повышения эффективности использования рассматриваемой конструкции электропривода необходимо, чтобы весь двигатель имел примерно одинаковый запас прочности, соответственно, его конструкция требует внесения изменений. Для этого необходимо проведение полного факторного эксперимента по определению возникающих напряжений в двигателе, по результатам которого можно установить определяющее и второстепенные проектные параметры [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесник М. Б. Определение потерь передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С.Н. Иванов, М.Б. Колесник, В.А. Макаренко, Т.К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 44-50.

2. Колесник М.Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М.Б. Колесник, Ю.Б. Колошенко, А.А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № IV-1 (47). – С. 14-19.

3. Ivanov S. N. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S.N. Ivanov, K.K. Kim, A.V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.

4. Иванов С.Н. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К.К. Ким, С.Н. Иванов, А.В. Горбунов, Т.С. Титова, В.В. Никитин, И.Г. Киселев // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.

5. Колесник М.Б. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / М.Б. Колесник, С.Н. Иванов, Ю.Б. Колошенко, А.А. Просолович, К.К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. 2021. – № I-1 (49) – С. 29-36.

6. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

7. Колесник М.Б. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / М.Б. Колесник, С.Н. Иванов, Ю.Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.

Автор:

Колесник Максим Борисович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Иванов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент Комсомольский-на-Амуре государственный университет.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДОВ И ВАННЫ ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ ПЕЧИ НА ЕЁ ТОКИ «ЗВЕЗДЫ» И «ТРЕУГОЛЬНИКА»

Ильгачёв А.Н., Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. Приводятся расчетные формулы и результаты исследования влияния геометрических параметров электродов и ванны двухэлектродных рудотермических печей и печей электрошлакового переплава на токи участков электрод-подина и электрод-электрод ванны.

Ключевые слова: схема замещения ванны, частичные проводимости, разностно-потенциальные коэффициенты, режим короткого замыкания ванны, режимы холостого хода ванны.

Для исследования распределения тока между электродами и подиной в ваннах рудотермических печей и печей электрошлакового переплава удобно использовать расчётные режимы короткого замыкания и холостого хода ванны [1-3].

В [2] предложены модели расчетных режимов короткого замыкания ванны многоэлектродных печей и на их основе формулы для определения частичных проводимостей их схем замещения. Кроме того, исследовано влияние геометрических параметров электродов прямоугольного и круглого сечений на проводимости ванн одноэлектродных и двухэлектродных печей.

Для двухэлектродной печи частичные проводимости схемы замещения ванны, приведенной на рис. 1, а, могут быть определены

$$g_{1,1} = \frac{\left(I_{1,1кз}^{(1)} - I_{1,2кз}^{(1)} \right)}{1_U^{(1)}}, \quad g_{2,2} = \frac{\left(I_{2,2кз}^{(2)} - I_{2,1кз}^{(2)} \right)}{1_U^{(2)}},$$
$$g_{1,2} = \frac{I_{1,2кз}^{(1)}}{1_U^{(1)}}, \quad g_{2,1} = \frac{I_{2,1кз}^{(2)}}{1_U^{(1)}},$$

где $1_U^{(i)}$ – единичное напряжение режима короткого замыкания, приложенное к участку « i -й электрод - подина»; $I_{i,jкз}^{(i)}$ – ток, протекающий в j -м электроде в режиме короткого замыкания ванны для i -го электрода.

В [3] предложены модели расчетных режимов холостого хода ванны многоэлектродных печей и на их основе формулы

для определения разностно-потенциальных коэффициентов её схемы замещения. В [4, 5] исследовано влияние геометрических параметров круглых и плоских электродов на разностно-потенциальные коэффициенты ванны двухэлектродных печей.

В соответствии с этими моделями для двухэлектродной печи разностно-потенциальные коэффициенты схемы замещения ванны (рис. 1, б) могут быть определены

$$R_{1,1} = U_{1,1\text{xx}}^{(1)} / 1_I^{(1)}, \quad R_{2,2} = U_{2,2\text{xx}}^{(2)} / 1_I^{(2)}, \quad R_{1,2} = U_{1,2\text{xx}}^{(1)} / 1_I^{(1)}, \quad R_{2,1} = U_{2,1\text{xx}}^{(2)} / 1_I^{(2)},$$

где $1_I^{(i)}$ – единичный ток электрода режима холостого хода ванны для i -ого электрода; $U_{i,j\text{xx}}^{(i)}$ – напряжение на участке « j -й электрод – подина», в режиме холостого хода ванны для i -го электрода.

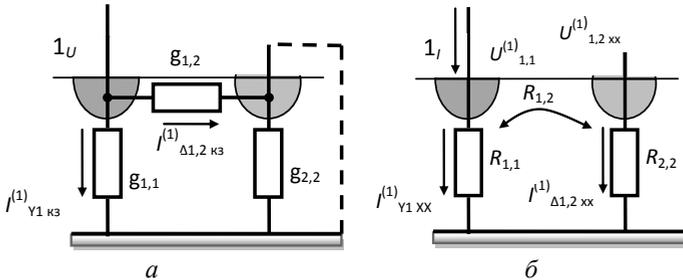


Рис. 1. Схемы замещения ванны двухэлектродной печи с частичными проводимостями (а) и с разностно-потенциальными коэффициентами (б)

Ток, стекающий с поверхности первого электрода в ванну непосредственно на расплав (подину) в режиме холостого хода ванны для первого электрода

$$I_{\gamma 1 \text{ xx}}^{(1)} = U_{1,1\text{xx}}^{(1)} g_{1,1} = 1_I^{(1)} R_{1,1} g_{1,1} = 1_I^{(1)} \Gamma_{1,1} G_{1,1}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{i,j} = \gamma l R_{i,j}$ – собственный разностно-потенциальный коэффициент схемы замещения ванны в критериальной форме; $G_{1,1} = g_{1,1} / \gamma l$ – собственная частичная проводимость схемы замещения ванны в критериальной форме; γ – усредненная удельная электрическая проводимость среды ванны; l – высота слабо проводящего слоя ванны.

Ток, стекающий с поверхности второго электрода на расплав (подину) в режиме холостого хода ванны для второго электрода

$$I_{Y2xx}^{(2)} = U_{2,2xx}^{(2)} g_{1,1} = 1_I^{(2)} R_{2,2} g_{2,2} = 1_I^{(2)} \Gamma_{2,2} G_{2,2}. \quad (2)$$

Ток, стекающий с поверхности первого электрода непосредственно на поверхность второго электрода в режиме холостого хода ванны для первого электрода

$$I_{\Delta 12xx}^{(1)} = (U_{1,1xx}^{(1)} - U_{1,2xx}^{(1)}) g_{1,2} = 1_I^{(1)} (R_{1,1} - R_{1,2}) g_{1,2} = 1_I^{(1)} (\Gamma_{1,1} - \Gamma_{1,2}) G_{1,2}.$$

Ток, стекающий с поверхности второго электрода непосредственно на поверхность первого электрода в режиме холостого хода ванны для второго электрода

$$I_{\Delta 2,1xx}^{(2)} = (U_{2,2xx}^{(2)} - U_{2,1xx}^{(2)}) g_{2,1} = 1_I^{(2)} (R_{2,2} - R_{2,1}) g_{2,1} = 1_I^{(2)} (\Gamma_{2,2} - \Gamma_{2,1}) G_{2,1}. \quad (3)$$

В соответствии с первым закона Кирхгофа для режимов холостого хода ванны

$$I_{Y1xx}^{(1)} + I_{\Delta 1,2}^{(1)} = 1, \quad I_{Y2xx}^{(2)} + I_{\Delta 2,1}^{(2)} = 1. \quad (4)$$

С учётом (1) – (3) из (4) следуют

$$\Gamma_{1,1} G_{1,1} + (\Gamma_{1,1} - \Gamma_{1,2}) G_{1,2} = 1, \quad \Gamma_{2,2} G_{2,2} + (\Gamma_{2,2} - \Gamma_{2,1}) G_{2,1} = 1,$$

поэтому

$$(\Gamma_{1,1} - \Gamma_{1,2}) G_{1,2} = 1 - \Gamma_{1,1} G_{1,1}, \quad (\Gamma_{2,2} - \Gamma_{2,1}) G_{2,1} = 1 - \Gamma_{2,2} G_{2,2}.$$

Таким образом

$$I_{\Delta 12xx}^{(1)} = 1_I^{(1)} (1 - \Gamma_{1,1} G_{1,1}), \quad I_{\Delta 21xx}^{(2)} = 1_I^{(2)} (1 - \Gamma_{2,2} G_{2,2}).$$

Если в электродах двухэлектродной печи протекают токи $\dot{i}_{\vartheta 1}$ и $\dot{i}_{\vartheta 2}$ (Рис. 2), то токи «звезды» и «треугольника» ванны

$$\begin{aligned} \dot{i}_{Y1} &= \Gamma_{1,1} G_{1,1} \dot{i}_{\vartheta 1} + (1 - \Gamma_{2,2} G_{2,2}) \dot{i}_{\vartheta 2}, \\ \dot{i}_{Y2} &= (1 - \Gamma_{1,1} G_{1,1}) \dot{i}_{\vartheta 1} + \Gamma_{2,2} G_{2,2} \dot{i}_{\vartheta 2}, \\ \dot{i}_{\Delta 12} &= (1 - \Gamma_{1,1} G_{1,1}) \dot{i}_{\vartheta 1} - (1 - \Gamma_{2,2} G_{2,2}) \dot{i}_{\vartheta 2}, \\ \dot{i}_{\Delta 21} &= (1 - \Gamma_{2,2} G_{2,2}) \dot{i}_{\vartheta 2} - (1 - \Gamma_{1,1} G_{1,1}) \dot{i}_{\vartheta 1}. \end{aligned}$$

При однофазном питании печи по схеме «электроды - подина», когда токи электродов равны, а электроды имеют одинаковые заглобления

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\vartheta 1} = \dot{i}_{\vartheta 2} = I_{\vartheta}, \quad \Gamma_{1,1} = \Gamma_{2,2} = \Gamma, \quad G_{1,1} = G_{2,2} = G, \\ \dot{i}_{Y1} = \Gamma G I_{\vartheta} + (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = I_{\vartheta}, \\ \dot{i}_{Y2} = (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} + \Gamma G I_{\vartheta} = I_{\vartheta}, \\ \dot{i}_{\Delta 12} = \dot{i}_{\Delta 21} = (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} - (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = 0. \end{aligned}$$

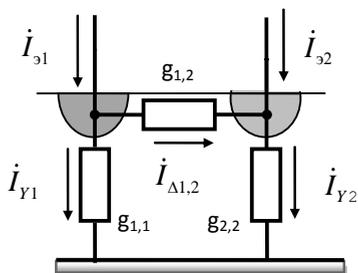


Рис. 2. Схема замещения ванны двухэлектродной печи с обозначениями токов

Из полученных соотношений видно, что при однофазном питании печи по схеме «электроды - подина» токи, стекающие с поверхностей электродов на поверхность расплава (подины), равны токам, протекающим в электродах, а ток, стекающий с поверхности одного электрода непосредственно на поверхность другого электрода, равен нулю.

При бифилярной схеме питания печи, когда электроды имеют одинаковые заглублия

$$\dot{i}_{\vartheta 1} = I_{\vartheta}, \dot{i}_{\vartheta 2} = -I_{\vartheta}, \Gamma_{1,1} = \Gamma_{2,2} = \Gamma, G_{1,1} = G_{2,2} = G,$$

$$\dot{i}_{Y1} = \Gamma G I_{\vartheta} - (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = (2\Gamma G - 1) I_{\vartheta},$$

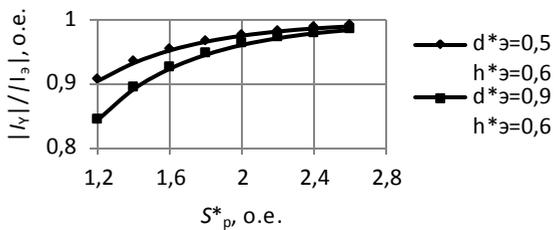
$$\dot{i}_{Y2} = -\Gamma G I_{\vartheta} + (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = (1 - 2\Gamma G) I_{\vartheta},$$

$$\dot{i}_{\Delta 12} = \dot{i}_{\Delta 21} = (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} + (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = 2(1 - \Gamma G) I_{\vartheta},$$

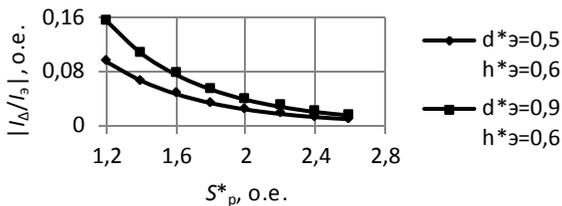
$$\dot{i}_{\Delta 12} = \dot{i}_{\Delta 21} = -(1 - \Gamma G) I_{\vartheta} - (1 - \Gamma G) I_{\vartheta} = 2(\Gamma G - 1) I_{\vartheta}.$$

На рис. 3, показаны зависимости относительного изменения токов, стекающих с поверхностей электродов, от расстояния между их осями и диаметра электродов при бифилярной схеме питания печи.

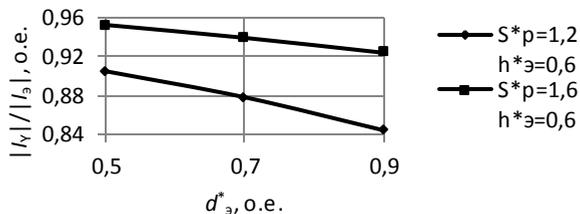
Анализ полученных зависимостей показывает, что при неизменном диаметре электродов с увеличением расстояния между их осями доля стекающего с поверхности электрода на расплав (подину) тока увеличивается, асимптотически приближаясь к единице, а доля тока, стекающего с поверхности одного электрода на другой, минуя подину, уменьшается, приближаясь к нулю.



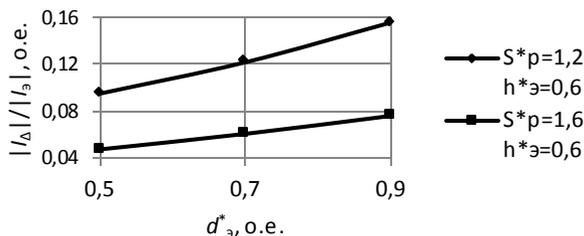
a



б



в



г

Рис. 3. Зависимости тока «электрод – подина» (а, в) и тока «электрод – электрод» (б, г) двухэлектродной печи от расстояния между электродами S_p (а, б) и от диаметра электрода d_3 (в, г)

При увеличении диаметра электродов и неизменном расстоянии между их осями доля стекающего с поверхности электрода на расплав (подину) тока уменьшается, а доля тока, стекающего с поверхности одного электрода на другой, увеличивается.

Выводы

1. С привлечением режимов короткого замыкания и режимов холостого хода ванны двухэлектродной печи получены формулы для определения токов, стекающих с поверхностей электродов на расплав (подину) и с поверхности одного электрода на другой.

2. Исследовано влияние диаметра электродов и расстояния между их осями на доли токов, стекающих с поверхностей электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ильгачёв А.Н.* Математические модели для расчета электрического поля ванн многоэлектродных рудно-термических печей / А.Н. Ильгачёв // *Электричество*, 2017, № 4, с. 62-65.

2. *Ильгачёв А.Н.* Частичные проводимости схемы замещения электрического процесса в ванне электродных печей резистивного нагрева / А.Н. Ильгачёв // *Вестник Чувашиского университета*. 2015. № 1. С. 73-80.

3. *Ильгачёв А.Н.* Разностно-потенциальные коэффициенты ванн многоэлектродных печей резистивного нагрева / А.Н. Ильгачёв // *Вестник Чувашиского университета*. 2006. № 2. С. 227-235.

4. *Ильгачёв А.Н.* Разностно-потенциальные коэффициенты как параметры схемы замещения электрического процесса в ванне многоэлектродных печей / А.Н. Ильгачёв // *Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф.* (г. Пермь, апрель 2015 г.). – Пермь: Меркурий, 2015. – vi, С. 76–79.

5. *Ильгачёв А.Н.* Исследование разностно-потенциальных коэффициентов ванн многоэлектродных печей резистивного нагрева // *Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 7. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та*, 2011. С. 196-209.

Автор:

Ильгачёв Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, факультет энергетики и электротехники Чувашиского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Закончил электротехнический факультет Чувашиского 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.

ВОПРОСЫ ВЫЯВЛЕНИЯ УТЕЧКИ ВОДЫ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Михеев Г.М., ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия

Свешников А.Г., ФГБОУ ВО «Чувашский государственный аграрный университет», г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы системы водоснабжения с помощью водонапорных башен и устройств с регулируемым электроприводом. Выявлено, что в системе водоснабжения с применением частотного преобразователя имеется сложность обнаружения факта утечки воды. Предложено выполнение этой задачи с использованием современных технологий, способов математического моделирования и программных продуктов.*

***Ключевые слова:** потребитель, традиционная система водоснабжения, водонапорная башня, водоснабжение с устройством частотного преобразователя, датчики давления, утечка воды.*

В последние годы водоснабжение малых населённых пунктов всё чаще осуществляется с применением скважинного насоса с устройством частотного регулирования. Данная система имеет свои преимущества перед традиционным способом водоснабжения с использованием водонапорных башен [1-6].

В случае применения приводов частотного регулирования снижается проектно-сметная стоимость строительства систем водоснабжения, и улучшаются некоторые технические решения. Одним из существенных достоинств решение этой проблемы таким путём является стабильность создаваемого давления в системе водоснабжения за счет автоматического регулирования, производительности насоса в зависимости от текущего расхода воды.

В этом случае повышается надежность работы оборудования, увеличивается стабильность водоснабжения в зимнее время и срок службы скважинного насоса. Вторым, немаловажным достоинством этой системы является отсутствие окисления воды, что влечёт за собой улучшение его качества, которое должно соответствовать нормативным требованиям [7].

Однако, недостатком этой системы по сравнению с традиционной (рис. 1, а), является трудность обнаружения факта утечки воды. Это связано с малым объемом воды в системе, так как она сосредоточена лишь в объемах трубопровода (рис. 1, б).

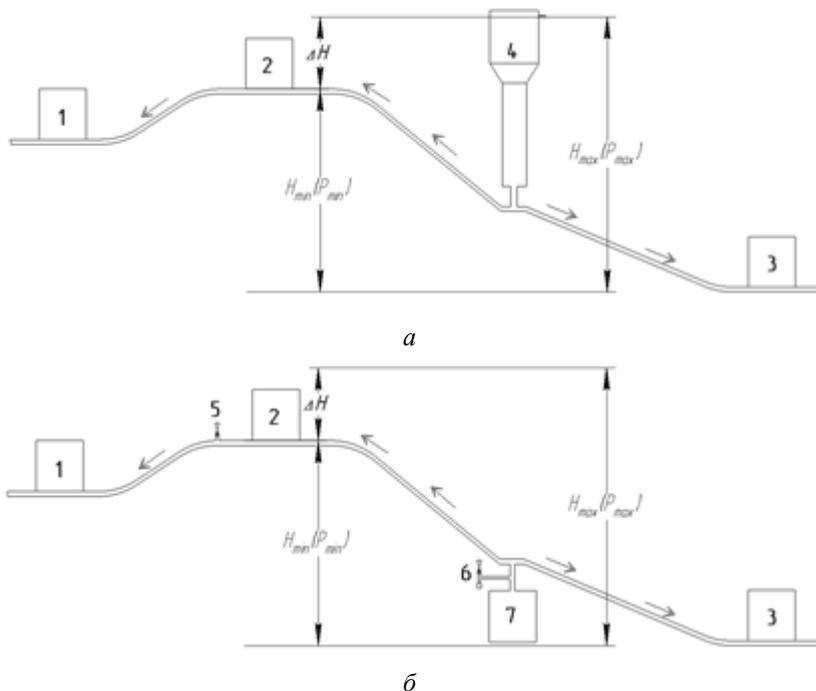


Рис. 1. Традиционная схема водоснабжения (а) и система водоснабжения с применением устройства частотного преобразователя (б), где 1...3 – потребители воды; 4 – водонапорная башня; 5 – обратный клапан; 6 – датчик давления с обратным клапаном; 7 – насосная станция с применением устройства частотного преобразователя

На рис. 1: ΔH – изменение давления или разница между максимальным и минимальным давлением воды в системе, $H_{max}(P_{max})$ – максимальное давление воды в системе, который необходим для удовлетворения потребности потребителя воды под номером 2, $H_{min}(P_{min})$ – минимальное давление воды в системе, который не всегда достаточно для удовлетворения потребности потребителя воды под номером 2.

С другой стороны, в случае малой утечки воды из трубопровода и избыточного давления в системе с водонапорной башней в месте дефекта сети образуется прорыв. В случае осуществления водоснабжения с применением частотного регулирования такой процесс отсутствует, и заметить утечку воды в этом случае практически невозможно. Решением данной проблемы занимались многие учёные ещё в прошлом веке [8, 9].

Обычно с водонапорной башней давление в системе сильно меняется с течением времени. Чтобы воды хватило всем, его накапливают больше, соответственно, повышается давление воды, что повышает вероятность её утечки на 5...7 %.

Напротив, в системе водоснабжения с применением частотного регулирования отсутствуют частые и большие перепады давления. Оно здесь более стабильно по сравнению с традиционным способом водоснабжения, что создаёт трудность в определении утечки воды. Поэтому встаёт вопрос определения факта утечки воды в системе. Эта задача будет ещё более актуальной в связи более широким применением системы водоснабжения, снабжённая с приводами частотного регулирования в будущем.

Выводы

Определение факта утечки воды в системе водоснабжения с применением частотного регулирования можно решить с помощью современных технологий и устройств с применением математического моделирования и программных продуктов. Данный вопрос требует проработки и продолжение работы в этом направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Водонапорная башня Рожновского*: Определение, назначение, устройство и ГОСТ. Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <https://p-z-o.ru/metallokonstrukcii/vodonapornye-bashni/vodonapornaya-bashnya-rozhnovskogo-opredelenie-naz>. Дата обращения 10.02.2021.

2. Свешников А. Г., Михеев Г. М., Зиганшин А. Г. Особенности водоснабжения сельских населённых пунктов // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы III Международной науч.-практ. конф.

(г.Чебоксары, 26 февраля 2021 г.). - Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, 2021. - С. 105-109.

3. Альтернатива водонапорной башне. Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <http://vksystem.ru/zamena-vodonapornoj-bashne/>. Дата обращения 10.02.2021.

4. Павлинова И.И. Водоснабжение и водоотведение: учебник и практикум для СПО / И.И. Павлинова, В.И. Баженов, И.Г. Губий. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2017 – 380 с.

5. Как ищут скрытые утечки воды из подземных трубопроводов систем водоснабжения. Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <https://vodablog.livejournal.com/118322.html>. Дата обращения 10.03.2021.

6. Лупина Т.А. Проектирование и расчеты систем водоснабжения: Учебно-методическое пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 39 с.

7. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М., 2002. – 103 с.

8. Авторское свидетельство СССР № 1313394, МПК А01G25/16, G05D7/03. Система обнаружения утечек в трубопроводах с промежуточным отбором воды / А.Ю. Штейнберг, В.В. Клейзит, А.М. Штейнберг. – № 3951945/30-15; заявл. 06.09.85; опубл. 30.05.87, Бюл. № 20. – 3 с.

9. Авторское свидетельство СССР № 1372114, МПК F15P1/00, А01G25/16, E02B13/00. Способ обнаружения утечек в трубопроводах автоматизированной закрытой оросительной системы и устройство для его осуществления / В.В. Матвеев, И.М. Рутенбург. – № 3997522/30-15; заявл. 12.11.85; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5. – 6 с.

Авторы:

Михеев Георгий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. E-mail: mikheevg@rambler.ru.

Свешников Артемий Григорьевич, аспирант кафедры механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства, Чувашский государственный аграрный университет. E-mail: artemachaki@mail.ru

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЛЭП ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДА

Мочалов Н.С., Ярославский Д.А., Нгуен В.В., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г.Казань, Россия

***Аннотация.** Стрела провеса является одним из важнейших параметров при обследовании воздушных линий электропередачи. В работе предлагается модернизированная система мониторинга состояния воздушных линий посредством внедрения нового метода определения стрелы провеса по периоду его собственных колебаний.*

***Ключевые слова:** стрела провеса провода, система мониторинга, колебания провода, автоматизированная система.*

К современным системам передачи электроэнергии предъявляются повышенные требования по надежности и бесперебойности работы. Обрывы, аварии на воздушных линиях (ВЛ) влекут за собой экономический ущерб и недоотпуск электроэнергии. Одной из главных причин аварий является недопустимые габариты проводов ВЛ по сравнению с их проектными нормативными значениями. Поэтому получение точных и объективных данных о пространственном положении проводов в сложных условиях измерений является актуальной задачей [1-2].

Редкий контроль стрелы провеса ВЛ может привести к аварийным ситуациям, так как она может быстро изменяться, особенно при очень низких температурах окружающей среды. В связи с этим, возникает необходимость постоянного контроля этого параметра с целью заблаговременного обнаружения аварийных ситуаций и прогнозирования их возникновения.

С этой целью был разработан простой и не затратный метод определения стрелы провеса провода по его периоду собственных колебаний. Подробно метод описан в работе [3]. Метод заключается в определении периода колебаний с помощью акселерометров, установленных на проводе (1), и дальнейшего расчета стрелы провеса по выведенной авторами формуле:

$$f_{\text{пр}} = \frac{5gT^2}{16\pi^2}, \quad (1)$$

где $f_{пр}$ – стрела провеса, T – период собственных колебаний провода, g – гравитационная постоянная, π – математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру.

Метод внедрен в систему автоматизированного мониторинга ВЛ, разработанный ранее в ФГБОУ ВО «КГЭУ» – СМГ-16 [4] (система мониторинга гололедаобразования-16) (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема модернизированной системы автоматизированного мониторинга состояния ВЛ

Устройство контроля системы устанавливается на проводе ВЛ и переходит в режим мониторинга автоматически либо по запросу с персонального компьютера. Причём устройства контроля могут устанавливаться на множестве пролётов ВЛ, самостоятельно выстраивая сенсорную сеть, включающую в себя все устройства контроля и работающую с пунктом сбора и обработки данных. Так обеспечивается простота установки и запуска разработанной системы мониторинга.

При модернизации устройства контроля подверглась изменению не только его аппаратная часть (добавление датчика), но и программное обеспечение, алгоритм которого представлен на рис. 2.

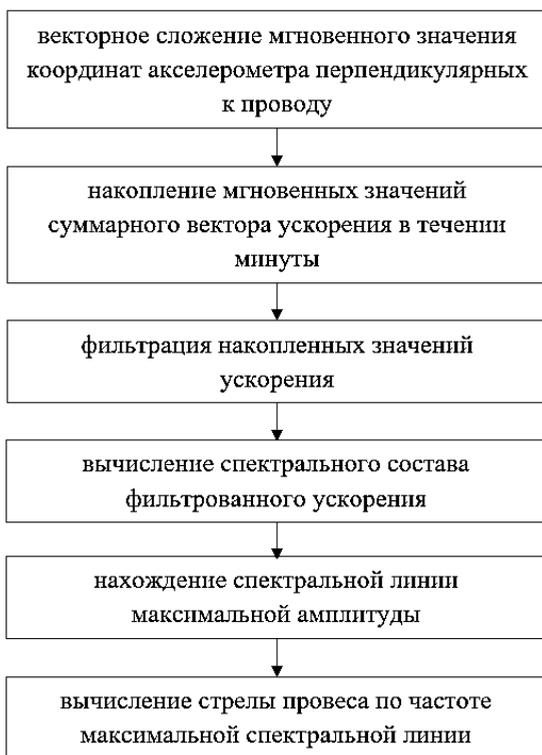


Рис. 2. Алгоритм работы ПО для усовершенствованной системы мониторинга

Модернизация позволит новой системе с высокой точностью определять важный параметр ВЛ – стрелу провеса. Это позволит более точно в сравнении с СМГ-16 определять механические нагрузки на проводе, контролировать перетяжку проводов, допустимый провес. Данный метод прост в реализации, проводится дистанционно и имеет низкую себестоимость.

Были проведены испытания метода и системы. Полученные с разработанных устройств контроля экспериментальные данные сравнивались с данными, полученными методом фотограмметрии [5]. Результаты коррелируют с высокой точностью, что подтверждает достоверность определения стрелы провеса про-

вода разработанным методом на основе данных о периоде собственных колебаний провода.

Максимальная относительная погрешность метода определения стрелы провеса основанного на измерении угла провеса, разработанного ранее для комплекса СМГ-16 при максимальной стреле провеса в пролете, как в натурном эксперименте (64 м), составляет 4,4 %, в предположении, что с абсолютной точностью измерены (известны) параметры пролета и провода, а также правильно произведена калибровка установленного датчика. Обычно это предположение не верно, что может в разы увеличить погрешность. Погрешность усовершенствованной системы мониторинга позволит определять стрелу провеса провода с точностью 2,92 %, что выше, чем в ранее разработанной системе СМГ-16.

Основным преимуществом разработанного метода определения стрелы провеса провода по периоду собственных колебаний является возможность измерения стрелы провеса без дополнительной информации о пролете (длина пролета, тип провода и т.п.), что делает метод удобным и универсальным для различных видов ЛЭП, контактных сетей и т.п. Это упрощает и ускоряет развертывание системы мониторинга.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме "Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей" (номер темы 075-00063-20-02).

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.20.504-94. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ. Утверждено Департаментом электрических сетей РАО «ЕЭС России» 19.09.94 г. Срок действия установлен с 01.01.96..
2. Правила устройства электроустановок (7-ое издание). Утверждены приказом Минэнерго РФ от 20 июня 2003, № 242.

3. Ярославский, Д.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи / Д.А. Ярославский, В.В. Нгуен, М.Ф. Садыков, М.П. Горячев, А.А. Наумов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – №. 3. – С. 97-106.

4. Ярославский Д.А. Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода: диссертация кандидата технических наук: 05.11.13 / Ярославский Д.А.; [Место защиты: КГЭУ]. - Казань, 2017. – 135 с.

5. Нгуен В.В. Метод определения стрелы провеса провода по периоду его собственных колебаний и усовершенствованная система автоматизированного мониторинга состояния ВЛЭП: диссертация кандидата технических наук: 2.2.8 / Нгуен В.В.; [Место защиты: КГЭУ]. - Казань, 2021. – 133 с.

Авторы:

Мочалов Николай Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник ФГБОУ ВО «КГЭУ». Окончил Институт электроэнергетики и электроники ФГБОУ ВО «КГЭУ» в 2017 году. E-mail: 79534929817@ya.ru.

Ярославский Данил Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБОУ ВО «КГЭУ». Окончил Институт электроэнергетики и электроники ФГБОУ ВО «КГЭУ» в 2004 году. Ученая степень получена в 2018 г. Тема: «Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода». E-mail: fbox52@gmail.com.

Нгуен Ван Ву, аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ». Окончил Военно-техническую академию г. Ханой, Вьетнам, по специальности «Автоматизация» в 2012 году. E-mail: tank567@ya.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАРУЖНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Хамидуллин И.Н., ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Научный руководитель: **Садыков М.Ф.**, д.т.н., доцент
Казанский государственный энергетический университет

***Аннотация.** В статье рассматривается проблема больших энергетических затрат на уличное освещение и предлагается разработанная в КГЭУ автоматизированная система управления наружным освещением. Система позволит автоматически регулировать освещенность уличных светильников в зависимости от уровня естественного освещения, также позволит управлять освещением с помощью web-сайта.*

***Ключевые слова:** уличное освещение, автоматизация, управление светильниками, освещенность, регулировка освещения.*

Рассматривая проблему больших энергетических затрат на уличное освещение, нами разработана и успешно внедрена в работу наружного или так называемого уличного освещения система управления наружным освещением (АСУНО).

Разработанная нами система соответствует основным требованиям к наружному освещению:

- 1) качество;
- 2) надежность системы;
- 3) безопасность для окружающих;
- 4) долговечность.

Автоматизированная система уличного освещения (АСУНО) разработана на базе ФГБОУ ВО КГЭУ.

Уличное освещение имеет определенные санитарные нормы и правила [2-3].

Традиционные уличные светильники имеют высокую мощность, а соответственно, потребляют много электроэнергии, при этом уличные светильники включаются на полную мощность сразу при наступлении сумерек, хотя в это время нет необходимости высокого освещения.

Исходя из вышесказанного, мы предполагаем, что для уменьшения траты электроэнергии целесообразно использова-

ние автоматического диммирования уличным освещением, при этом, не нарушая нормативные установки.

Для выполнения данной цели была разработана автоматизированная система уличного освещения (АСУНО) (рис. 1). АСУНО состоит из: контроллера АСУНО NEMA 1-10V, блока управления и связи, веб-сайта (рис. 1), светильника компании «Ферекс». Связь блоков между собой осуществляется по беспроводной связи [1, 4, 5].

АСУНО позволяет автоматически регулировать уровень освещенности светильников в зависимости от естественного освещения. Контроль всех светильников и регулирование их вручную осуществляется через Веб-сайт.



Рис. 1. Система уличного освещения

Преимущества АСУНО:

- значительное снижение затрат на электроэнергию,
- автоматическое плавное снижение яркости в ночные часы при уменьшении транспортной нагрузки на дороги,
- работа в различных режимах,
- быстрая окупаемость,
- удаленный мониторинг состояния каждого светильника,
- автоматическое определение посторонних подключений.

Разработанный веб-сайт, имеет следующие возможности:

- отображение местоположения светильника и щитов управления на карте местности,
- создание или установка сценария на группу или группы светильников,
- автоматическое обнаружение стороннего подключения к электросети,
- вывод статистики и аналитики на каждую группы светильников.

Однако доступ к веб-сайту не всегда возможен в силу ряда обстоятельств. В некоторых регионах России за пределами города отсутствует возможность доступа к интернету. Решением данной проблемы мы считаем, использование заранее запланированного под данный регион годового расписания. На рис. 2 представлен график работы светильников.

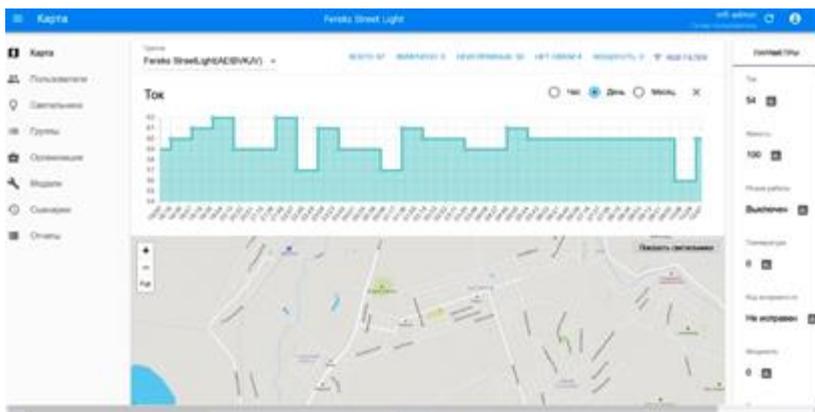


Рис. 2. График работы светильников

График работы (рис. 3) включает в себя годовое расписание:

- 1) регулирование яркости освещения в зависимости от времени суток (в темное время суток и при большом количестве людей на улицах светильники работают на полную мощность, после 24.00 часов светильники переходят в режим энергосбережения и светят на 50 % от своей мощности);
- 2) включение/выключение.

ОПИСАНИЕ РАСПИСАНИЕ

Время выключения

Январь с 1 по 5	Январь с 6 по 10	Январь с 11 по 15	Январь с 16 по 20	Январь с 21 по 25	Январь с 26 по 31
08 : 00	☒ 07 : 57	☒ 07 : 57	☒ 07 : 46	☒ 07 : 38	☒ 07 : 38
Февраль с 1 по 5	Февраль с 6 по 10	Февраль с 11 по 15	Февраль с 16 по 20	Февраль с 21 по 25	Февраль с 26 по 31
07 : 19	☒ 07 : 08	☒ 06 : 58	☒ 06 : 45	☒ 06 : 34	☒ 06 : 25
Март с 1 по 5	Март с 6 по 10	Март с 11 по 15	Март с 16 по 20	Март с 21 по 25	Март с 26 по 31
06 : 12	☒ 06 : 00	☒ 05 : 46	☒ 05 : 32	☒ 05 : 19	☒ 05 : 01
Апрель с 1 по 5	Апрель с 6 по 10	Апрель с 11 по 15	Апрель с 16 по 20	Апрель с 21 по 25	Апрель с 26 по 31
04 : 46	☒ 04 : 32	☒ 04 : 17	☒ 04 : 03	☒ 03 : 50	☒ 03 : 37
Май с 1 по 5	Май с 6 по 10	Май с 11 по 15	Май с 16 по 20	Май с 21 по 25	Май с 26 по 31
03 : 24	☒ 03 : 11	☒ 02 : 58	☒ 02 : 46	☒ 02 : 35	☒ 02 : 23
Июнь с 1 по 5	Июнь с 6 по 10	Июнь с 11 по 15	Июнь с 16 по 20	Июнь с 21 по 25	Июнь с 26 по 31
02 : 14	☒ 02 : 08	☒ 02 : 03	☒ 02 : 03	☒ 02 : 07	☒ 02 : 10
Июль с 1 по 5	Июль с 6 по 10	Июль с 11 по 15	Июль с 16 по 20	Июль с 21 по 25	Июль с 26 по 31
02 : 17	☒ 02 : 25	☒ 02 : 33	☒ 02 : 43	☒ 02 : 55	☒ 03 : 09
Август с 1 по 5	Август с 6 по 10	Август с 11 по 15	Август с 16 по 20	Август с 21 по 25	Август с 26 по 31
03 : 21	☒ 03 : 34	☒ 03 : 46	☒ 03 : 59	☒ 04 : 09	☒ 04 : 24

Рис. 3. Годовое расписание работы светильников

Работа по созданию беспроводных модулей связи для АСУНО выполнена при финансовой поддержке прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИ-ЭР) Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по Соглашению №14.577.21.0168 от 27 октября 2015 года, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0168.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура контроля параметров световых приборов, осветительных установок и цветоцветовой среды / Шириев Р.Р., Иванов Д.А., Галиева Т.Г. // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 11. С. 14-17.

2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 12 мая 2018 года) [Электронный ресурс]: распоряжение от 22 ноября 2008 года N 1734-р – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678>.

3. Свод правил 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*) [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/456054197>.

4. Солюянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солюянов В.И. Энергоресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 1. – С. 156-166.

5. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Development the experimental stand for testing of experimental samples of wireless network for process automation module. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Т. 8. № 12. С. 899-902.

Автор:

Хамидуллин Ильдар Ниязович, студент института электроэнергетики и электроники ФГБОУ ВО КГЭУ. E-mail: ildar.ildar-ham2017@yandex.ru.

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Назаров М.А., г Тольятти, Россия

Хренников А.Ю., г. Москва, Россия

***Аннотация.** Трансформатор собственных нужд является важным элементом, который обеспечивает функционирование подстанции. Использование энергоэффективных масляных трансформаторов позволяет снизить потери на собственные нужды подстанции. Проблемы внедрения энергоэффективных трансформаторов собственных нужд связаны в основном с экономическими трудностями (высокая стоимость, длительный срок окупаемости оборудования).*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, трансформаторы собственных нужд, снижение потерь.*

Значительную часть трансформаторов собственных нужд составляют масляные трансформаторы.

Нормативные документы и стандарты определяют четыре класса энергоэффективности масляных трансформаторов:

- 1) стандартный;
- 2) энергоэффективный;
- 3) высокий энергоэффективный;
- 4) инновационный.

К первому классу (стандартному) относятся большинство выпускаемых трансформаторов.

Стандарт СТО 34.01-3.2-011-2017 устанавливает следующие категории потерь в масляных трансформаторах напряжением 6-10 кВ (табл. 1):

- 1) категории потерь для холостого хода: X1, X2, X3, X4;
- 2) категории потерь для короткого замыкания: K1, K2, K3.

Сочетание категорий потерь определяет класс энергоэффективности трансформатора, который определяется по наивысшей категории энергоэффективности (табл. 2).

Второй класс (X2K2) энергоэффективности масляных трансформаторов является рекомендуемым Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2015 года N600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности».

Таблица 1

Потери в масляных трансформаторах различных категорий энергоэффективности

Мощность, кВА	Категория энергоэффективности						
	Потери ХХ, Вт				Потери КЗ, Вт		
	X1	X2	X3	X4	K1	K2	K3
63	175	160	128	104	1280	1270	1031
100	260	217	180	145	1970	1591	1475
160	375	300	260	210	2900	2136	2000
250	520	425	360	300	3700	2955	2750
400	750	565	520	430	5400	4182	3850
630	1000	696	730	560	7600	6136	5600
1000	1400	957	940	770	10600	9545	9000
1250	1500	1350	1150	950	13500	13250	11000
1600	1950	1478	1450	1200	16500	15455	14000
2500	2600	2130	2100	1750	26500	23182	22000

Таблица 2

Сочетания классов энергоэффективности трансформаторов

<i>Потери</i>	P_{XX}			
P_{K3}	X1	X2	X3	X4
K1	X1K1	X2K1	X3K1	X4K1
K2	X1K2	X2K2	X3K2	X4K2
K3	X1K3	X3K2	X3K3	X4K3

На данный момент основным стандартом, который определяет требования к разрабатываемым трансформаторам является СТО 34.01-3.2-011-2017.

Сегодня основные трансформаторные заводы, как российские, так и в странах СНГ, выпускают линейки масляных трансформаторов с характеристиками потерь холостого хода и короткого замыкания в самых широких диапазонах значений.

Большой выбор масляных трансформаторов позволяет определить наиболее оптимальное решение для собственных нужд подстанции. Одним из основных критериев выбора на сегодняшний день остается стоимость оборудования, а также его окупаемость.

В соответствии со стандартом СТО 34.01-3.2-011-2017 закупка распределительных трансформаторов должна осуществляться с учетом оценки стоимости потерь электроэнергии на протяжении всего нормативного срока службы трансформатора. Упрощенно (для предварительной оценки) – по минимизации приведенных затрат при эксплуатации трансформатора, определяемых по упрощенной схеме (без учета методики расчета совокупной капитализированной стоимости) по формуле:

$$З_{\Pi} = \frac{C_T}{n} + A \cdot (N \cdot P_0 + \beta^2 \cdot \tau \cdot P_K)$$

где $З_{\Pi}$ – приведенные к году эксплуатационные издержки, руб.; C_T – стоимость трансформатора, руб.; P_0 – потери холостого хода, кВт; P_K – потери короткого замыкания, кВт; τ – число часов наибольших потерь мощности, час; β – коэффициент загрузки трансформатора, о.е.; A – тариф на компенсацию потерь электроэнергии руб./кВт·ч; n – число лет нормативного срока эксплуатации трансформатора; N – годовое число часов (8760).

Перед внедрением энергоэффективных трансформаторов собственных нужд проводят комплексную оценку потенциала энергосбережения.

Во многих случаях, энергоэффективные трансформаторы собственных нужд не окупаются, что приводит к тому, что проекты по внедрению трансформаторов собственных нужд не реализуются.

В расчете окупаемости значительную роль играет коэффициент загрузки трансформатора. Внедрение энергоэффективного трансформатора собственных нужд выгоднее в том случае, если их несколько, поскольку чтобы повысить коэффициент загрузки необходимо производить отключения малозагруженных трансформаторов. Наиболее эффективным вариантом является отключение трансформаторов низких классов энергоэффективности, что позволит повысить сроки окупаемости энергоэффективных трансформаторов.

Выводы

Основными проблемами внедрения энергоэффективных трансформаторов собственных нужд являются стоимость и длительный период окупаемости.

Для увеличения коэффициента загрузки необходимо отключать малозагруженные трансформаторы с низким классом энергоэффективности. Это позволит уменьшить период окупаемости и в тоже время повысить энергетическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савинцев Ю.М. Анализ взаимосвязи цены распределительного трансформатора с его характеристиками потерь холостого хода и короткого замыкания // Научно-технический журнал «Энергия единой сети». – 2019. – № 1 (43). С. 76-82.

2. СТО 34.01-3.2-011-2017. Трансформаторы силовые распределительные 6-10 кВ мощностью 63-2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания // Стандарт организации ПАО «Россети». 2017, С.10.

3. Грунтович Н.В., Капанский А.А. Оценка и повышение энергоэффективности работы трансформаторов при проведении энергетического обследования // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – №2(23). С. 52-65.

4. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 186 с.

Авторы:

Назаров Максим Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет». E-mail: taximnazarov27@gmail.com.

Хренников Александр Юревич, доктор технических наук, профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС - начальник отдела НТС и НТИ, АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети, электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1986 году, к.т.н. – 1997 г., Докторская диссертация: «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования», 2009 год. E-mail: ak2390@inbox.ru.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С КОНДЕНСАТОРНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Лавриненко В.А., Николаев Д.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Приведены особенности работы, характеристики, расчётные осциллограммы электромагнитного момента и тока в режиме пуска электропривода центробежного насоса с конденсаторным асинхронным двигателем.*

***Ключевые слова:** электропривод, центробежный насос, пуск.*

Согласно отчёту Европейской комиссии [1], насосные системы потребляют почти 22 % всей электроэнергии, вырабатываемой во всем мире. Следовательно, актуальной является задача разработки энергоэффективных электроприводов насосных агрегатов. Улучшение энергоэффективности электропривода насосного агрегата может быть обеспечено за счёт правильного выбора элементов электропривода, его нагрузки и гидравлической сети [2-6].

Электроприводы насосных агрегатов получили широкое распространение во всех отраслях промышленности. В частности, маломощные электроприводы насосов широко применяются для подачи воды в посудомоечных машинах.

Целью статьи является ознакомление с результатами разработки авторами статьи механической части энергосберегающего электропривода насоса с конденсаторным асинхронным двигателем. К особенностям электропривода центробежного насоса можно отнести относительно простую конструкцию, отсутствие электрического преобразователя, частые прямые пуски от однофазной сети переменного тока, отсутствие регулирования скорости вращения, невысокую цену и работу в условиях повышенных значений температуры и влажности. Структурная схема электропривода приведена на рис. 1. В задачу микроконтроллера входит формирование команд пуска и останова для режимов мойки и ополаскивания. На режимы работы электропривода и его коэффициента полезного действия (КПД) влияют колебания напряжения сети, температура и влажность окружающей среды, загрязнение насоса остатками смываемой пищи.



Рис. 1. Структурная схема исследуемого электропривода

Одним из вариантов оптимизации режима работы является максимизация КПД насосного агрегата. Режим работы с максимальным КПД является оптимальным для насосного агрегата. Предпочтительным рабочим диапазоном считается диапазон $\pm 20\%$ оптимального значения подачи. Допустимым рабочим диапазоном является диапазон значений подач жидкости от плюс 30 до минус 125 % оптимального значения подачи.

Эксплуатация вне пределов допустимого рабочего диапазона, определённого производителем насоса, является недопустимой.

Затраты энергии определяются значениями подачи перекачиваемой жидкости, необходимой высотой подъёма жидкости и параметрами насосного оборудования и трубопровода.

Мощность электродвигателя для привода при прямом соединении вала с рабочим колесом выбирается по максимальной мощности насоса

$$P_2 = k \rho Q_{\max} H_{Q_{\max}} / (367000 \eta_{Q_{\max}}),$$

где P_2 – мощность на валу электродвигателя, кВт; Q_{\max} – максимально возможная объемная подача насоса, м³/ч; $H_{Q_{\max}}$ – напор, м; $\eta_{Q_{\max}}$ – КПД насоса при Q_{\max} ; ρ – плотность жидкости, кг/м³; k –

коэффициент запаса, выбираемый в зависимости от условий работы агрегата. По ГОСТ 12878-67 рекомендуется значение коэффициента запаса $k = 1,25$ для насосов с мощностью до 20 кВт.

По значению максимальной мощности P_2 выбирается ближайший по каталогу тип электродвигателя. Номинальная мощность двигателя должна быть больше расчётной мощности P_2 .

После выбора электродвигателя необходимо проверить соответствие его пусковых характеристик условиям работы агрегата в системе. Момент сопротивления насосного агрегата включает в себя момент трения вращающихся частей и момент, затрачиваемый на ускорение массы жидкости в трубопроводе.

КПД насосного агрегата

$$\eta_{\text{агр.}} = 9,81 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot Q_{\text{в}} \cdot H_{\text{в}} / P_{\text{агр.}}$$

где $\eta_{\text{агр.}}$ – КПД насосного агрегата, %; 9,81 – значение ускорения свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; $Q_{\text{в}}$ – объёмная подача воды электронасосом, м³/с; $H_{\text{в}}$ – напор, м; $P_{\text{агр.}}$ – мощность, потребляемая насосным агрегатом из электрической сети, Вт.

Были проведены экспериментальные исследования гидромеханических параметров центробежного насоса, позволившие выявить, что импортный аналог разрабатываемого насоса работал с КПД 17 % и с подачей 90 л/мин, значения которых находятся за пределами допустимого рабочего диапазона. На рис. 3 режим работы импортного аналога насоса соответствует напору $H = 9$ м и подаче $Q = 90$ л/мин.

При разработке нового насоса была решена задача увеличения к.п.д. с 17 до 29 % за счёт проектирования авторами статьи нового рабочего колеса с увеличенным количеством лопастей и оптимальными углами β в соответствии с рис. 2. Режим работы нового насоса переместился в допустимый рабочий диапазон ближе к предпочтительному рабочему диапазону. Подача воды увеличилась до 188 л/мин или в 2,09 раза.

Оптимальный режим работы агрегата соответствует максимальному КПД $\eta_{\text{агр.}}$ в соответствии с рис. 3. Дальнейшее увеличение нагрузки электродвигателя с целью перемещения рабочей точки насоса в область оптимального режима с подачей $Q=250$

л/мин оказалось невозможным вследствие чрезмерного нагрева насоса в условиях повышенных значений температуры перекачиваемой воды и влажности воздуха.

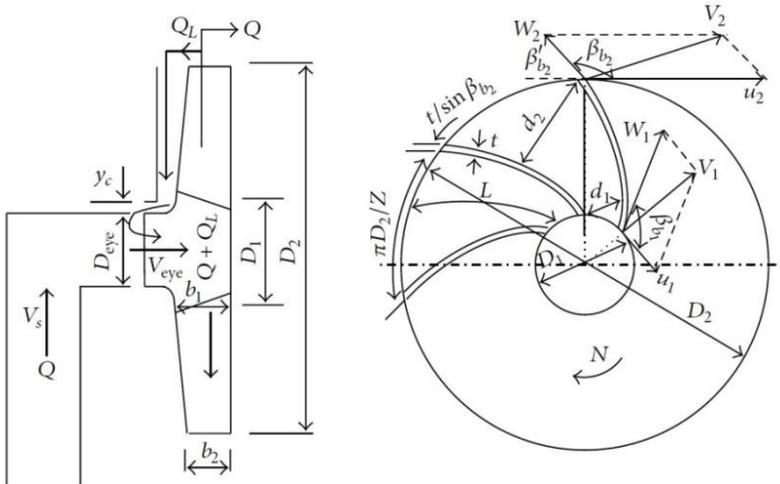


Рис. 2. Параметры рабочего колеса

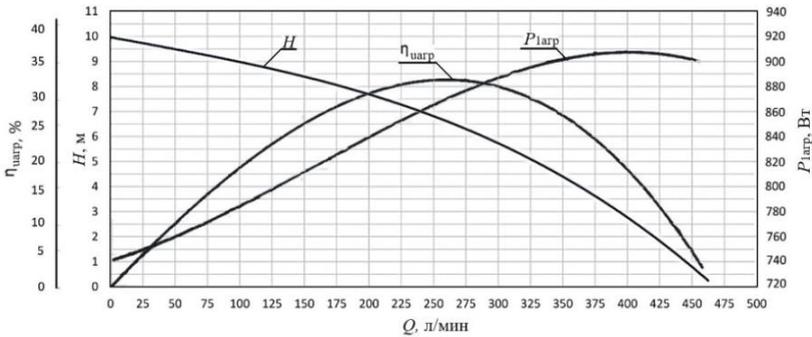
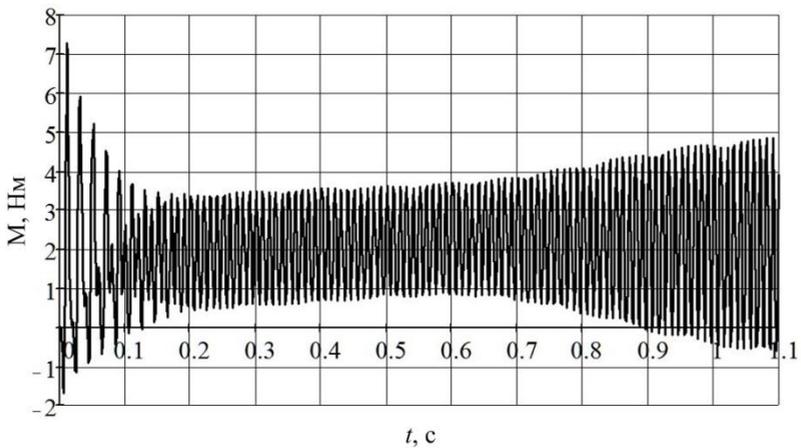
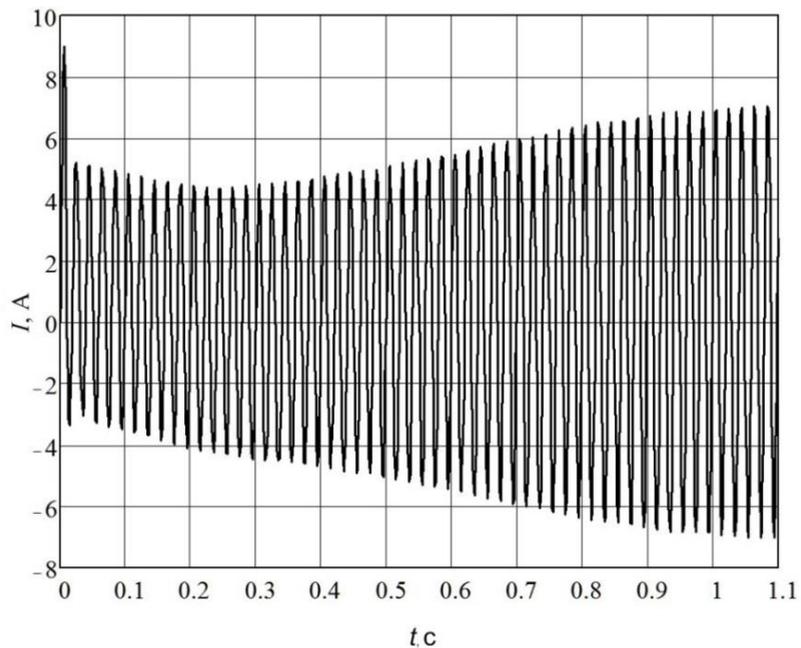


Рис. 3. Зависимости величин от подачи Q для разработанного насоса: а – напора H; б – КПД агрегата η_{agr} ; в – потребляемой электрической мощности P_{agr}



a



б

Рис. 4. Расчётные осциллограммы:
a – электромагнитного момента; *б* – тока

Прямой пуск электропривода от сети длится 1,1 с в соответствии с рис. 4. Пусковой ток превышает номинальный ток в 2,05 раза. Значения времени пуска и пускового тока являются близкими к соответствующим значениям итальянского аналога L71.T150.2V.

Общий вид разработанного насосного агрегата представлен на рис. 5. Основные характеристики приведены в таблице.

Таблица

Технические характеристики насосных агрегатов

Наименование величины	Олимпия L71.T150.2V (Италия)	Разработанный насос (Россия)
Напряжение, В	238	238
Частота, Гц	50	50
Ток, А	3,1	3,3
Скорость вращения, об/мин	2835	2818
КПД, %	30	29
Масса, кг	7,5	6,8
Габариты (диаметр x длина), мм	176×314	179×275



Рис. 5. Общий вид разработанного насосного агрегата

Выводы

Применение разработанного авторами статьи нового насоса в посудомоющих машинах позволит улучшить качество мойки при одновременном сокращении времени работы насоса на 50 %. При этом уменьшится потребление электроприводом электроэнергии на 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. European Commission. Study on Improving the Energy Efficiency of Pumps. 2001. Available online: <http://www.jakob-albertsen.dk/komposit/Darmstadtrapport.pdf> (accessed on 27 November 2019).
2. *Браславский И.Я., Ишиматов З.Ш., Поляков В.Н.* Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Асадема, 2004. 202 с.
3. *Лавриненко В.А.* Пуск электропривода вентиляторной установки с конденсаторным асинхронным двигателем // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. / Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – С.96-101.
4. Энергосбережение средствами электропривода: Докл. науч.-метод. семинара.- М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 80 с.
5. *Лавриненко В.А.* Анализ характеристик регулируемых асинхронных микродвигателей бытового назначения // Электротехника.1994. № 1. С. 15-18.
6. *Lavrinenko V.* Mathematical model of small induction motors with magnetic asymmetry // Proceedings of IPEMC'2000. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference / Tsinghua University, Beijing, China, August 15-18, 2000, vol. 3, pp. 1342-1346.

Авторы:

Лавриненко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Закончил 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.

Николаев Д.В., магистрант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, факультет энергетики и электротехники.

РЕМОНТОПРИГОДНАЯ ГОЛОВКА ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ

Петросов Ю.М., Михадаров Д.Г., Леонов В.В., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Рассмотрен ряд конструкций охлаждаемых электрододержателей дуговой печи.*

***Ключевые слова:** дуговая печь, электрододержатель, графитовый электрод, токоподвод.*

В подавляющем большинстве случаев при своей работе токоведущие узлы электротехнологического оборудования оснащаются интенсивным охлаждением. Основная, преследуемая при этом цель – предотвращение чрезмерного нагрева токоведущих элементов и уменьшение их износа.

Электрододержатели дуговых печей в разных вариациях состоят из головки с хомутом и медной водоохлаждаемой контактной щеки для подачи тока к графитированному электроду, токопроводящего рукава для передачи тока от гибких кабелей контактной щеке и пружинно-гидравлического механизма зажима или разжима электрода. В некоторых случаях токоведущий рукав выполняется в виде монолитной полой заготовки из алюминиевого сплава, армированного пучком стальных труб [1].

Наиболее распространённым для печей малой и средней ёмкости считается электрододержатель (рис. 1), головка которого предназначена для зажима графитового электрода диаметром 350 мм и подвода к нему электрического тока [2]. Зажим электрода осуществляется хомутом 8. Головка электрододержателя 5 представляет собой сварную конструкцию корпуса из немагнитной нержавеющей стали, на которой закреплены две медные контактные щеки 4. Токоподвод осуществляется через медную контактную плиту 1, приваренную в верхней части контактных щёк. Подвод охлаждающей воды производится через патрубок 2, сваренный в отверстие контактной щеки, далее вода проходит через каналы контактных щёк, выполненные методом глубокого сверления.

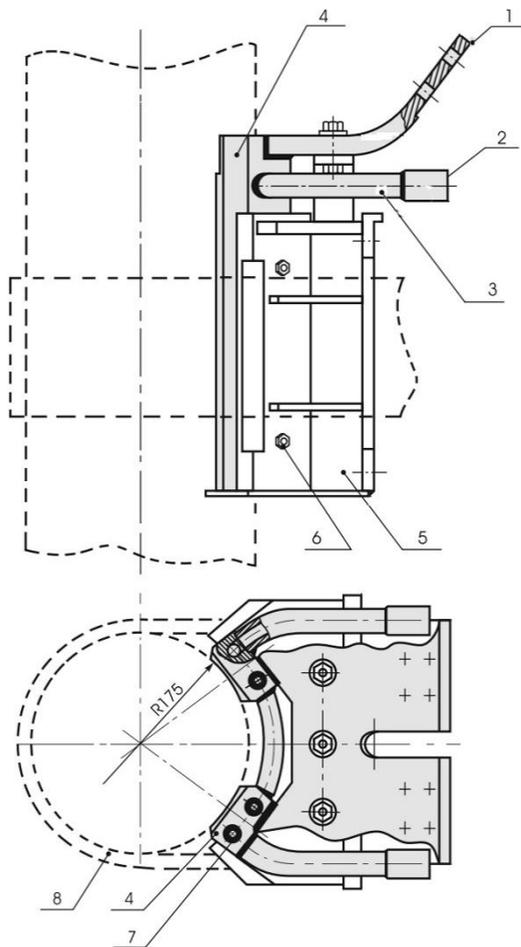


Рис. 1. Головка электрододержателя ДСП-12:

1 – плита контактная; 2 – патрубок водяного охлаждения; 3 – патрубок соединительный; 4 – щека контактная; 5 – корпус головки; 6 – болты крепления; 7 – заглушка; 8 – хомут механизма зажима электрода

Кроме упомянутой конструкции широко применяется электрододержатель дуговой электропечи, созданный СКБ «Сиб-электротерм», содержащий рукав, механизм зажима электрода и головку с контактной щекой, в котором для охлаждения контактной поверхности щеки используется медная плита толщи-

ной 120 мм, в теле которой при помощи глубокого сверления организован канал охлаждения. Зажим электрода осуществляется хомутом 2 (рис. 2). Конструкция контактной щеки 1 предусматривает совмещённый токоподвод и подвод охлаждающей воды.

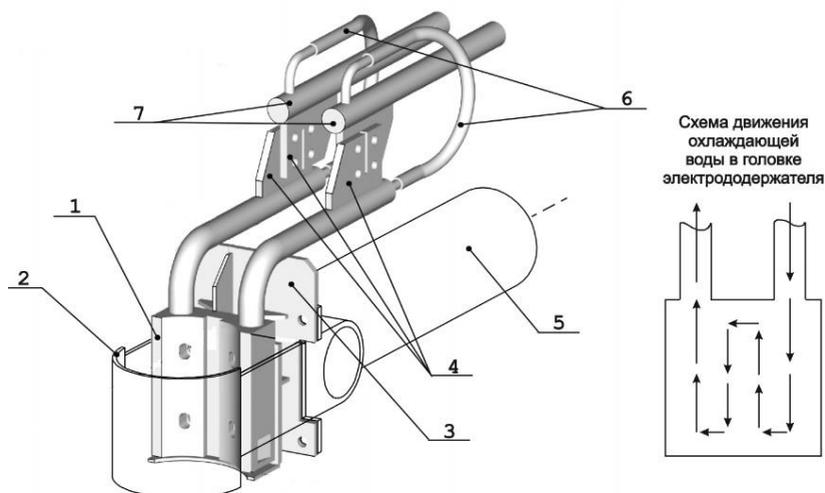


Рис. 2. Головка электродержателя печей ДС-10И и ДС-6Н1:
 1 – щека контактная электрододержателя; 2 – хомут механизма зажима электрода; 3 – корпус головки электрододержателя; 4 – пластины контактные переходные; 5 – рукав электрододержателя; 6 – патрубки водяного охлаждения; 7 – трубошины

Недостатком этих и других используемых конструкций является нагрев контактной щеки под действием проходящих токов, ударных коротких замыканий и резонансных явлений из-за того, что электроды, поставляемые отечественной промышленностью, идут с плюсовым и минусовым отклонениями по диаметру (по ГОСТ 4426-80), что влечёт за собой ситуации, при которых контактная поверхность электрод-щека недостаточна, т.к. фактически сводится к отдельным точкам (рис. 3).

При отклонении диаметра электрода в ту или иную сторону, что практически всегда имеет место, контакт между щекой и электродом получается в лучшем случае линейным (либо по ли-

ниям 2 и 3, либо по линиям 1 и 4). Отсюда следует главный недостаток существующих конструкций электроконтактного узла электрододержателя – высокое контактное сопротивление. Как следствие – вибрация конструкции и возникновение микродуг.

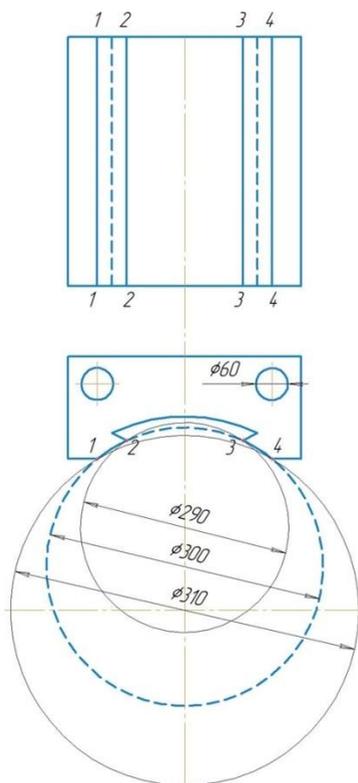


Рис. 3. Стандартная головка электродержателя

Совершенно очевидно, что уменьшение массы электрододержателя за счёт замены части медной контактной щеки на сталь, значительное упрощение изготовления узла за счёт полного отказа от глубокого сверления медной заготовки, увеличение его эксплуатационной стойкости за счёт увеличения площади контакта электрода с токоподводящей частью конструкции и, как следствие надёжности всего узла, приведёт к улучшению ремонтпригодности электрододержателя.

Для устранения вышеуказанных недостатков представляется перспективной конструкция электрододержателя, обеспечивающая его преимущества перед известными конструкциями, которая заключается в том, что для улучшения проводимости конструкции путём уменьшения её контактного сопротивления, а значит и нагрева, контактная щека выполнена биметаллической, один слой которой – стальной, обеспечивает жёсткость конструкции, а другой – медный, хорошую электрическую проводимость [3]. Кроме того, между этой частью щеки и графитированным электродом печи установлен графитовый вкладыш, одна поверхность которого плотно прилегает к медной токопроводящей поверхности щеки, а другая поверхность имеет кривизну, повторяющую кривизну поверхности графитированного электрода. В этом случае значительно уменьшается масса всего узла за счёт замены части медной конструкции на стальную.

В такой конструкции контакт между электродом и щекой электрододержателя разделяется на два контакта (рис. 4): «щека-графитовый вкладыш» и «графитовый вкладыш-электрод».

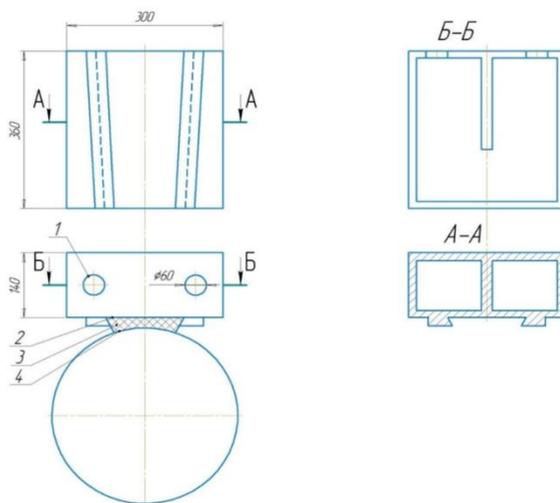


Рис. 4. Щека электрододержателя:

- 1 – отверстия для трубошин; 2 – контакт «щека-графитовый вкладыш»;
3 – графитовый вкладыш; 4 – контакт «графитовый вкладыш-электрод»

Электрический ток, пройдя по трубошину, вваренным в отверстие 1, переходит на медную часть биметаллической пластины и далее к плоскостному контакту 2 «щека-графитовый вкладыш». Графитовый вкладыш прочно и плотно удерживается на медной части биметаллической пластины при помощи направляющих «ласточкин хвост». Пройдя через графитовый вкладыш 3, ток подходит к контакту «электрод-графитовый вкладыш» 4, который тоже является плоскостным (согласно диаметру электрода – по дуге), т.к. во время перепуска электрода вкладыш и электрод неизбежно «притрутся» друг к другу.

Для изготовления такой головки электрододержателя требуется биметаллическая пластина толщиной 20 мм. Контактная (рабочая) сторона пластины медная, а внутренняя стальная. Пластина легко может быть изготовлена при помощи электрошлакового переплава. На медной стороне фрезеруются канавки до стального основания для того, чтобы приварить направляющие под «ласточкин хвост».

Затем приваривают сами направляющие. На внутренней – стальной стороне приваривают рёбра и фрезеруют отдельные части стального листа до меди с целью организации хорошего охлаждения последней. Сверху и с боков всё закрывается стальным листом и проваривается по периметру для получения замкнутой «рубашки» охлаждения.

Такая конструкция имеет высокую ремонтпригодность, которая заключается только в замене графитового вкладыша (он, в свою очередь может быть легко изготовлен из электродного «боя», имеющегося в большом количестве около дуговой печи).

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2145469. Российская Федерация, МПК F27D 11/10. Конструктивные элементы или оборудование нагревательных, обжиговых, плавильных или ретортных печей: № 97121517/06: заявл. 09.12.1997: опубл. 10.02.2004 / И.М. Бершицкий, В.А. Военный, В.М. Миронов и др. – 2 с.

2. Кабели силовые и другое оборудование коротких сетей металлургических печей: каталог продукции ООО «Фонд Металл». –URL:

https://fondmet.ru/Catalog_Produkcii_Fond_Metall.pdf (дата обращения 02.10.2021).

3. Патент 2705832. Российская Федерация, МПК F27D 11/10. Конструктивные элементы или оборудование нагревательных, обжиговых, плавильных или ретортных печей: № 2019111043: заявл. 11.04.2019: опубл. 12.11.2019 / Ю.М. Петросов.

Авторы:

Петросов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1979 году энергетический факультет Азербайджанского Института Нефти и Химии (г. Баку). В 1990 году защитил кандидатскую диссертацию во Всесоюзном научно-исследовательском институте электротермического оборудования (ВНИИЭТО) по специальности 05.09.10 «Электротехнология». E-mail: petrosov58@mail.ru.

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. Защита в 2016 году по специальности «Электротехнология». E-mail: denis_georg@mail.ru.

Леонов Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1979 году кафедру электротермических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1991 году защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском электротехническом институте имени В.И. Ульянова (Ленина) по специальности 05.09.10 «Электротехнология». E-mail: leonv57@mail.ru.

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С УДВОЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Рассматривается шестифазный синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения и с реактивным ротором, имеющим один полюс. Электродвигатель имеет удвоенную частоту вращения по сравнению с традиционными электродвигателями.*

***Ключевые слова:** синхронный электродвигатель, реактивный ротор, обмотка возбуждения.*

Известно, что при питании серийно выпускаемых электродвигателей переменного тока от трехфазной сети с частотой 50 Гц максимальная частота вращения равна 3000 об/мин. Для электропривода турбомеханизмов – насосов, вентиляторов, компрессоров – весьма актуальной является задача увеличения частоты вращения. Довольно часто она решается за счет применения преобразователей частоты. Однако получить удвоенную частоту 6000 об/мин при питании от трехфазной сети с частотой 50 Гц можно за счет применения шестифазного синхронного двигателя с реактивным ротором.

Рассмотрим конструкцию предлагаемого синхронного двигателя. В основу данной разработки положена конструкция синхронного двигателя, имеющего торцевую конструкцию [1]. В этом двигателе имеется реактивный ротор в виде ферромагнитного диска, насаженного эксцентрично на вал, т.е. имеющий один явно выраженный полюс. На статоре имеются шесть С-образных магнитопроводов, выполненных из шихтованной электротехнической стали с фазами, которые питаются переменными напряжениями со сдвигом на 30° или на $\pi/6$ радиан.

В синхронном двигателе, приведенном в [1], возникает пространственная волна магнитного поля, имеющая один максимум модуля магнитной индукции. К этому месту и стремится реактивный полюс ротора, не реагирующий на полярность поля. Недостатком этого двигателя является низкая энергетическая эффективность, присущая всем электродвигателям с реактивными роторами.

В предлагаемом к рассмотрению синхронном двигателе, конструкция которого показана на рис. 1, 2, ротор выполнен в виде двух ферромагнитных дисков, насаженных эксцентрично на вал и объединенных ферромагнитной втулкой.

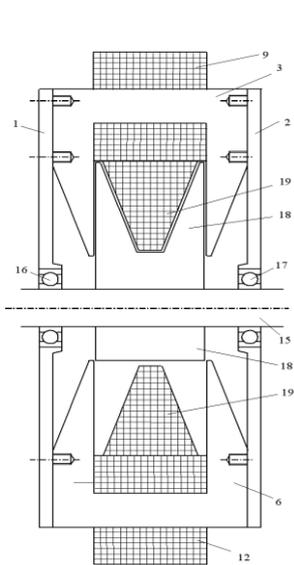


Рис. 1. Продольное сечение двигателя

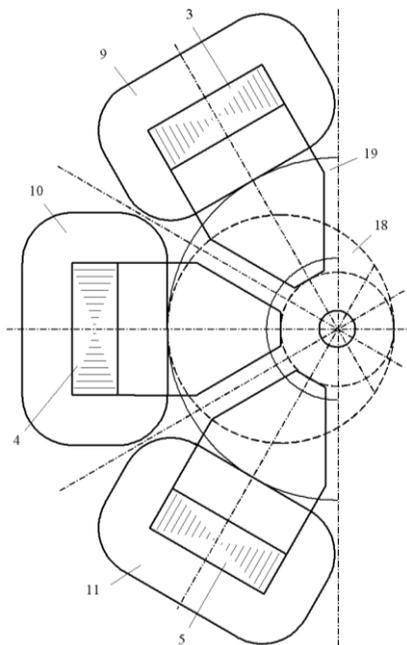


Рис. 2. Поперечное сечение двигателя

Между дисками расположена обмотка возбуждения, питаемая переменным напряжением с частотой, совпадающей с частотой питания и вдвое меньшей частоты вращения ротора.

Синхронный электродвигатель имеет два подшипниковых щита 1, 2. На них установлено шесть магнитопроводов 3 – 8 с фазами 9 – 14. Вал 15 опирается на подшипники 16, 17, установленные в подшипниковые щиты 1, 2. На валу 15 установлен ротор 18, а на статоре установлена обмотка возбуждения 19.

Подшипниковые щиты в виде двух дисков установлены в корпусе, который не показан. Магнитопроводы 3 – 8 имеют С-образную форму и выполнены из шихтованной электротехниче-

ской стали. На магнитопроводы 3 – 8 наложены фазы 9 – 14 (A – F), питаемые переменными напряжениями, сдвинутыми по фазе на угол 30° или на $\pi/6$ радиан, как и в [1].

Ротор 18 выполнен в виде двух ферромагнитных дисков, объединенных ферромагнитной втулкой и установленных эксцентрично на валу 15. Между этими дисками находится неподвижная обмотка возбуждения 19, питаемая напряжением, зависящим от положения ротора.

Электродвигатель работает следующим образом. При питании фаз 9 – 14 переменными напряжениями в рабочих зазорах возникают магнитные потоки, значения которых соответствуют синусоидальной функции со сдвигом на угол 30 гр. или на $\pi/6$ рад. Эти потоки имеют единственный максимум абсолютного значения в пространстве, куда и стремится полюс ротора.

Три положения ротора при его повороте на угол π и изменении фаз токов на угол $\pi/2$ показаны на рис. 3 – 5. Отметим, что изменение угла поворота ротора α на угол 2π соответствует изменению фазы тока на угол π . Указаны значения магнитных потенциалов на поверхностях магнитопроводов с одной стороны в условных единицах. Угол α измеряется между осью фазы A и продольной осью ротора. Видно, что во всех случаях ось максимальных модулей магнитных потенциалов перпендикулярна продольной оси ротора. Это соответствует максимальному реактивному моменту при отсутствии обмотки возбуждения. Например, на рис. 3 максимальный потенциал 10 находится на фазе C.

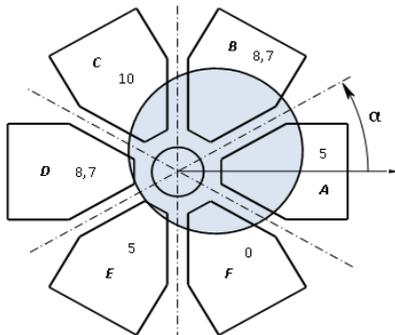


Рис. 3. Угол $\alpha = \pi/6$

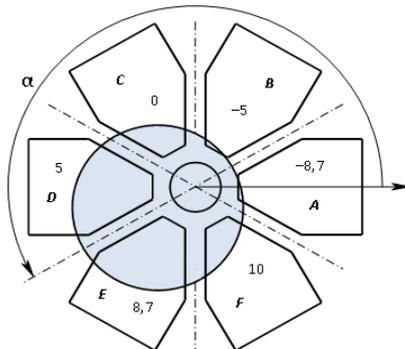


Рис. 4. Угол $\alpha = 7\pi/6$

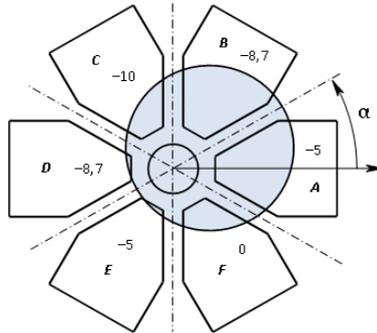


Рис. 7. Угол $\alpha = 13\pi/6$

Для увеличения энергетической эффективности предлагается наложить на ротор обмотку возбуждения, которая питается с той же частотой, что и фазы статора, но с учетом положения ротора. На рис. 3 показано положение ротора, когда все магнитные потенциалы магнитопроводов положительны. Здесь целесообразен отрицательный потенциал ротора, который будет притягиваться к указанной области.

На рис. 4 показано положение ротора, при котором среднее значение магнитных потенциалов равно нулю. Здесь возбуждение ротора нецелесообразно. Ток возбуждения ротора должен быть равен нулю при углах $4\pi/3$, $4\pi/3 + 2\pi$ и т.д. При этом фазы тока A имеют значения $\pi/4$, $\pi/4 + \pi$, $\pi/4 + 2\pi$ и т.д.

На рис. 5 показано положение ротора, когда все потенциалы отрицательны, а ротор должен иметь положительный потенциал. Следовательно, ток обмотки возбуждения i_f должен иметь максимальные значения I_{fm} и $-I_{fm}$ при углах $\pi/3$, $\pi/3 + 2\pi$ и т.д. При этом фазы тока статора i_A имеют значения $3\pi/4$, $3\pi/4 + \pi$ и т.д.

Приведем формулы для фазных токов статора и тока возбуждения ротора:

$$i_A = I_m \sin(\alpha/2 + 3\pi/4); \quad (1)$$

$$i_B = I_m \sin(\alpha/2 + 7\pi/12); \quad (2)$$

$$i_C = I_m \sin(\alpha/2 + 5\pi/12); \quad (3)$$

$$i_D = I_m \sin(\alpha/2 + \pi/4); \quad (4)$$

$$i_E = I_m \sin(\alpha/2 + \pi/12); \quad (5)$$

$$i_F = I_m \sin(\alpha/2 - \pi/12); \quad (6)$$

$$i_f = I_{fm} \sin(\alpha/2 - 2\pi/3). \quad (7)$$

В соответствии с рис. 3–5 и на основании (1) – (7) на рис. 6 построены кривые фазных токов обмотки статора и тока обмотки возбуждения.

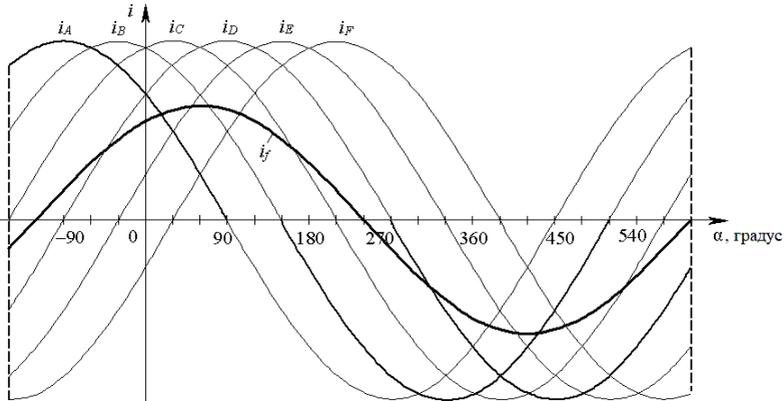


Рис. 6. Кривые фазных токов обмотки статора и тока обмотки возбуждения

Электромагнитный момент определяется формулой

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \frac{d\Lambda_k}{d\alpha} (i_k w + i_f w_f)^2. \quad (8)$$

где Λ_k – магнитная проводимость между ротором и k -ым магнитопроводом; w – число витков фазы обмотки статора; w_f – число витков обмотки возбуждения.

Если

$$\Lambda_k = \Lambda_0 + \Lambda_m \cos(\alpha - (k-1)\pi/3),$$

то

$$\frac{d\Lambda_k}{d\alpha} = -\Lambda_m \sin(\alpha - (k-1)\pi/3),$$

где Λ_0 – постоянная составляющая магнитных проводимостей Λ_k ; Λ_m – амплитуда переменных составляющих магнитных проводимостей Λ_k .

Для подтверждения теоретических положений на основании (8) проведен расчет моментной характеристики синхронного двигателя при следующих значениях параметров: $w = 100$; $I_m = 2$ А; $w_f = 20$; $I_{fm} = 5$ А; $\Lambda_m = 0,0025$ Гн; $\sin(5\pi/12) \approx 0,965926$.

Средний момент электродвигателя определяется выражением

$$M_o = 0,75\Lambda_m(I_m w)^2 + \sin(5\pi/12) \cdot I_m w \cdot I_{fm} w_f.$$

График моментной характеристики показан на рис. 7.

Без обмотки возбуждения момент имеет постоянное значение $M_c = 75$ Н·м. С обмоткой возбуждения момент изменяется по углу α в пределах от 75 Н·м до 147,444 Н·м, а среднее значение момента – $M_o = 123,296$ Н·м. Очевидно, что средний момент M_o больше момента M_c на 39,17 %.

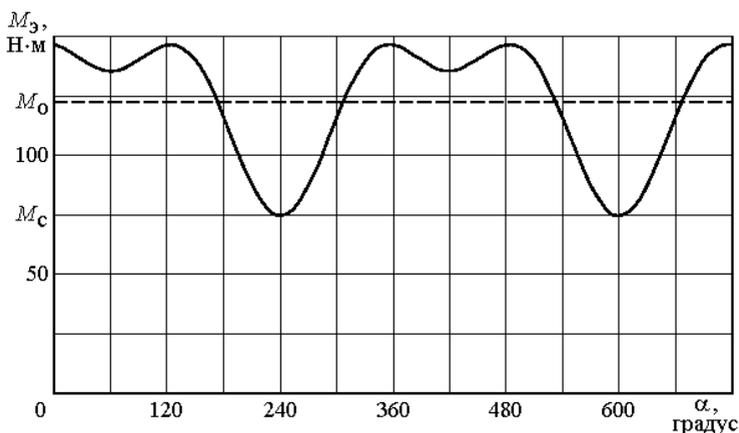


Рис. 7. Моментная характеристика

Анализ моментной характеристики показывает, что момент состоит из двух компонент – из постоянного реактивного момента M_c и неотрицательного переменного активного момента, равного нулю в отдельных точках, когда ток возбуждения равен нулю. Переменная составляющая момента состоит из первой и второй гармоник. Первая гармоника по углу поворота ротора как функция времени имеет удвоенную частоту по отношению к частоте питающих напряжений.

Вывод

Таким образом, на основании анализа принципа действия синхронного двигателя показана возможность получения скорости вращения ротора 6000 об/мин при питании от сети частотой 50 Гц, а проведенный расчет моментной характеристики подтверждает эффективность введения обмотки возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2704308 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/06; Н 02 К 41/06; Н 02 К 1/06. Синхронный электродвигатель / А.Ю. Афанасьев, А.Р. Каримов, А.А. Петров, Е.Е. Студнева; заявитель и патентообладатель КНИТУ-КАИ. – № 2019104557; заявл. 18.02.19; опубл. 28.10.19, Бюл. № 31.

Авторы:

Афанасьев Анатолий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электрооборудования, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ». Закончил 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». Закончил 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.

Петров Алексей Андреевич, аспирант кафедры Электрооборудования, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ». Закончил магистратуру института автоматики и электронного приборостроения Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ в 2019 году. E-mail: petrovalekse95@mail.ru.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА И АЛГОРИТМ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Калинин А.Г., Ильин С.А., Андреев В.А., Семенов Л.А., Андреева Т.В., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Приведены результаты опытно-конструкторской работы коллектива авторов, реализованной по заказу Института физики металлов, в части электропривода и пультового комплекса в опытной станции сварки трением с перемешиванием. Найдено унифицированное решение консоли станции сварки на основе функциональных характеристик электроприводов и систем измерений в технологическом процессе. Описан алгоритм для реализации полуавтоматического хода сварки, выработанный на опытном образце. Установлено, что применение гибкой оптической связи удовлетворяет темпам процессов в установках такого типа и способствует унификации пультовых решения в последующих изделиях.*

***Ключевые слова:** сварка алюминия, полуавтоматическая сварка, чистые технологии сварки, гибкая оптическая связь, следящий электропривод, релейный регулятор.*

Технология сварки трением с перемешиванием (СТП) в настоящее время достаточно хорошо изучена и вызывает положительный отклик у ведущих специалистов сварочного производства [3-7]. Основной задачей является ее распространение в материальном производстве применительно к конкретным технологическим процессам [1-2].

В 2020 году Чувашский госуниверситет по заказу Института физики металлов М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН) произвел установку сварки трением с перемешиванием «Малахит» (далее УСТП) [8] (рис 1). Характеристики УСТП следующие: толщина свариваемых материалов 1,5..20 мм; рабочее пространство стола 3000×2000 мм; длина шва по оси X 2000 мм; длина шва по оси Y 1500 мм; рабочий ход инструмента по оси Z 800 мм; осевое усилие на инструменте до 4 тонн; скорость хода инструмента 10-500 мм/мин; частота вращения инструмента до 2500 об/мин; мощность главного привода 18,5 кВт; угол наклона инструмента 0-3 град.; сменный ре-

дуктор с отношением 2,5; 4; 10; функция фрезерования кромок; функция полуавтоматической сварки; функция записи протокола шва.



Рис. 1. УСТП «Малахит» ИФМ УрО РАН

Техническое задание предусматривало режим полного ручного управления и режим полуавтоматического хода шва с заменой участия человека на стадиях – внедрение инструмента в материал, контроль усилия на инструмент, контроль мощности на шпинделе, ход по траектории шва, выход инструмента из материала. При этом корректировка технологических уставок должна быть доступна во всех исполнительных режимах СТП.

Поскольку траектория шва не предусматривала криволинейного хода, а выбор направления шва однозначно определялся ориентацией угла наклона инструмента – принято решение о применении общепромышленной автоматики с наличием функции записи архивов переменных с программной реализацией линейной траектории движения на открытых языках МЭК61131-3.

Все электроприводы станка сделаны на основе асинхронных частотно-регулируемых приводов с векторным бездатчиковым управлением Omron серии Q2V (Япония) на двигателях с принудительной вентиляцией серии АДЧР (Россия). Контроллер

станка и пультовой комплекс выполнены на основе свободно программируемых приборов ОВЕН ПЛК160 (Россия) и сенсорной панели оператора Weintek (Тайвань). Измерительная система по осям X и Y подстроена на относительных энкодерах Delta (Тайвань) в винтовых передачах, по осям Z и Z1 на абсолютных энкодерах тросового типа SICK (Германия), съемная видеочка с функцией регистратора и пирометрии фирмы Pyrospot DGE (Германия) со шкалой 250..1200 °C с ноутбуком в комплекте. Электрооборудование и кабеленесущие системы сгруппированы по уровням рабочих напряжений с разделением сторон силовой и слаботочной части относительно станка и в шкафу приводов относительно преобразователей частоты и вводного распределительного устройства. Включение станка реализовано на последовательности реле времени в контакторах питания приводов для исключения рывка тока на заряд конденсаторов преобразователей частоты.

Архитектура системы управления движением спроектирована в виде трех шкафов: шкаф приводов, подвижный шкаф контроллера и подвижный шкаф пульта на портале. Рабочее напряжение слаботочных сетей 24 В, климатическая зона УХЛ4, степень защиты оболочки IP54. Стабильный интерфейс связи между приборами шкафа контроллера и преобразователями частоты выполнен на основе приборов MOXA TCF-142-M через гибкое оптоволокно в цепном кабелеукладчике силовых цепей.

Станок спроектирован всесторонне управляемым и конфигурируемым с точки зрения управления движением и дальнейшего развития под новые техпроцессы. Задание частот вращения приводов преимущественно аналоговое через потенциометр в клеммы преобразователей, задание направления движения аналоговое через клеммы дискретных входов преобразователей. Работа конечных выключателей всех координат сделана на разрыв аналогового задания направления. Индикация задания скоростей по приводам производится на панели оператора интерфейсным опросом преобразователей с последующим приведением в единицы измерения скорости перемещения. Радиусы приведения введены в контроллер станка на основе заложенных коэффициентов передач механических узлов.

Аварийная сигнализация спроектирована на основе встроенного реле преобразователей частоты. Кнопка аварийного останова вводит в дискретные входы всех преобразователей логический сигнал «Авария». Сброс аварии – отдельная кнопка на шкафу приводов с командой в клеммы всех преобразователей частоты. В параметрах приводов аварийный останов запрограммирован экстренной остановкой, сброс аварии состоится только при снятии управления с приводов на пульте для исключения послеаварийного движения. Любой последовательности аварийных событий заложена световая и звуковая сигнализация до снятия управления с них и нажатия кнопки сброса аварии.

Панель оператора УСТП сенсорная, применены встроенные символы отображения переменных, сенсорное управление любым движением приводов исключено при разработке приложения. Разработанное для панели приложение помимо задачи отображения позволяет управлять записью переменных техпроцесса на внешний USB-носитель в формате CSV(Excel), а так же вести локальный справочник режимов сварки в энергонезависимой памяти панели. Функция записи архивов и менеджеры рецептов являются стандартными пользовательскими наборами для разработчиков приложений на панелях Weintek.

Режим полуавтоматической сварки (рис. 2) сделан с реализацией схемы дублирования функции аппаратов ручного управления контактами встроенных в контроллер реле, так функция конечных выключателей сохраняется и защищает координаты от выхода за ограничители хода. Задача УЦИ и контроллера координатного движения XYZ так же реализована на разработанном ПО контроллера ОВЕН ПЛК160. При постоянстве частоты вращения инструмента и скорости его продольной подачи основных критериев качественного шва два: достигнутое усилие и мощность на инструменте. При выполнении этих условий попережное усилие на инструмент минимальное. Согласно схеме алгоритма (рис. 2) если хотя бы один критерий оптимальности не выполняется – движения по траектории шва нет до возобновления заданных условий. Это позволило исключить влияние человеческого фактора при синхронном контроле двух величин во время движения по шву.

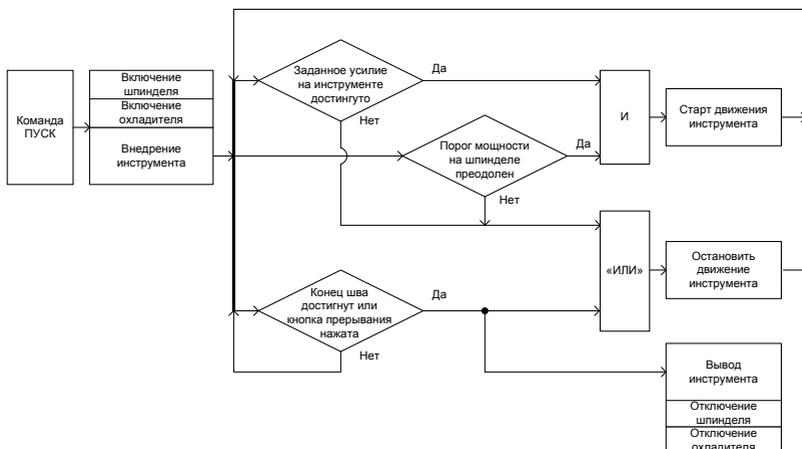


Рис. 2. Схема алгоритма режима полуавтоматической сварки

Регулятор усилия F на инструменте релейного типа (рис. 3), работает в цикле полуавтоматического режима как вложенный алгоритм. Измерение усилия организовано с помощью линейного потенциометра, работающего на величину сжатия пружин, и откалиброванного в АЦП контроллера переносной весоизмерительной системой. Разброс (размах) значений усилия относительно уставки не превышал при испытаниях 100 кгс на малых нережимных нагрузках, до 40 кгс в зоне номинальных нагрузок.

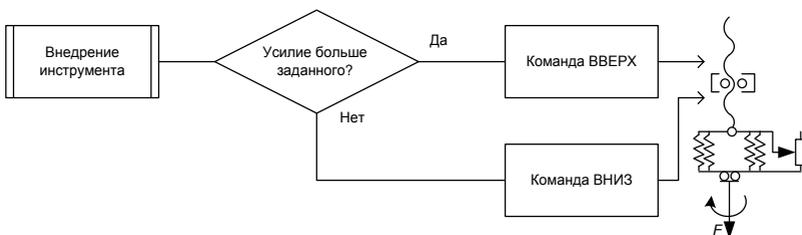


Рис. 3. Регулятор осевого усилия на инструменте

Алгоритмы (рис. 2 и 3) значительно упрощают программный код траектории хода шва, который представляет собой команду направления движения при известных координатах начала и конца шва: при пробном ручном проходе оператору достаточно обнулить счетчик УЦИ в начале шва, и задать позицию

УЦИ после вывода инструмента в конце шва. Так команда направления движения по шву формируется знаком координаты конца шва, которая коммутирует соответствующие контакты пультовой рукоятки направления встроенным реле контроллера. Возврат в исходную точку начала шва – обратная команда с логической операцией блокировки внедрения инструмента. Стадии внедрения и вывода инструмента – команды, формируемые регулятором рис. 3, при этом окончание или прерывание шва осуществляются логической блокировкой движения вниз (рис. 3) с работой движения вверх до концевого выключателя.



Рис. 4. Фотография прохода в полуавтоматическом режиме и консоли УСТП «Малахит», оптимизированной по результатам наладки

Шов полуавтоматической СТП в три последовательных прохода приведен на рис. 4, а. Качество шва удовлетворительное и одинаковое на всех проходах. Пультовая реализация УСТП после испытаний оптимизирована и приведена на рис. 4, б.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко Ю.В. А. с. 195846 СССР. Способ сварки металлов трением // Б. И. 1967. Вып. 10.
2. Бакшаев В.А., Васильев П.А., Гордон Л.К., Тодин Ю.А., Васильев С.В. Технология сварки трением с перемешиванием в производстве алюминиевых полуприцепов // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 12. С. 13–17.

3. Штрикман М.М. Тенденции развития процесса фрикционной сварки вращающимся стержнем // Сварочное производство. 2014. № 3. С. 34-44.

4. Friction Stir Welding and Processing. Rajiv S. Mishra and Murray W. Mahoney editors. ASM International. 2007.

5. Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием. Ростов н/Д. Издательский центр ДГТУ. 2012. 135 с.

6. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2020. 476 с.

7. Остерман Ф. Технология применения алюминия. М.: НП «АПРАЛ». 2019. 872 с.

8. П.А. Васильев, О.В. Христофоров, В.П. Данилов, А.В. Дмитриев, А.Г. Калинин, В.Н. Осанов, И.П. Васильев, В.С. Григорьев // Установка сварки трением с перемешиванием «Малахит» / Сварщик в России 2020, №6. С. 1-4.

Автор:

Калинин Алексей Германович, кандидат технических наук, доцент, доцент, факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Закончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2007 году. Степень кандидата технических наук получил в 2011 году, диссертация защищена по специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы. E-mail: hutapoid1984@yande.ru.

Ильин Сергей Александрович, окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2019 году. Инженер-конструктор ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». E-mail: sergeics@rambler.ru.

Андреев Вячеслав Андреевич, окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2019 году. Инженер-конструктор ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». E-mail: sl.andreev.318@gmail.com

Андреева Татьяна Вячеславовна, окончила факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2019 году. Начальник производства ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». E-mail: tanuyikha21@mail.ru.

Семенов Лев Ананьевич, окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2017 году. Инженер-конструктор ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». E-mail: onlyformemory@mail.ru.

УСТРОЙСТВО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Макаров В.Г., Бариев Р.Х., ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Рассматривается устройство идентификации, позволяющее оценивать параметры схемы замещения фазы и частоту вращения асинхронного электродвигателя без использования датчиков частоты вращения, углового ускорения и устройств дифференцирования. Принцип действия устройства основан на использовании функции чувствительности по параметрам и скорости.*

***Ключевые слова:** идентификация параметров и процессов, асинхронный двигатель, функции чувствительности, обобщенная электрическая машина.*

Для эффективного управления асинхронным двигателем, работающим в составе частотно-регулируемого электропривода, необходимо знать текущие значения его параметров и величин – таких как активные сопротивления и индуктивности фаз обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность, суммарный момент инерции, статический момент и частота вращения ротора. Перечисленные параметры в процессе работы электропривода могут существенно отличаться от расчетных значений. Это объясняется изменением режимов работы, неточностью изготовления, старением элементов системы и т. п. Изменение параметров приводит к изменению коэффициентов уравнений, заложенных в систему управления электропривода в виде алгоритма управления и вызывает изменение статических и динамических свойств системы. В последние годы появилась тенденция построения систем управления электроприводами не содержащих в своем составе датчиков скорости. В связи с этим актуальной является задача бездатчикового определения частоты вращения ротора, которую целесообразно решать параллельно с задачей идентификации параметров [1].

В [2] предложено устройство оценивания параметров электродвигателя, позволяющее с помощью непрерывного градиентного метода поиска минимума функции от невязок уравнений электропривода идентифицировать семь параметров асин-

хронного двигателя: активные сопротивления и индуктивности фаз обмоток статора и ротора, взаимную индуктивность, суммарный момент инерции, статический момент. Идеи, заложенные в [2], получили дальнейшее развитие в [3], где предложено устройство оценивания параметров асинхронного электродвигателя, позволяющее с помощью непрерывного градиентного метода поиска минимума функции от невязок уравнений электропривода идентифицировать те же семь параметров асинхронного двигателя, а также проводить оценку процессов – токов короткозамкнутого ротора. К недостаткам устройств [2, 3] можно отнести наличие устройств дифференцирования фазных токов статора, датчика частоты вращения вала, датчика углового ускорения и невозможность оценки частоты вращения ротора электродвигателя.

Для решения задачи оценивания параметров и скорости вращения асинхронного двигателя предлагается метод, основанный на определении функций чувствительности токов фаз статора обобщенной электрической машины (ОЭМ) [4].

При оценке параметров и переменных величин будем пользоваться математическим описанием ОЭМ:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}); \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}); \\ 0 = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ 0 = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}); \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = p_n (p_n M_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) - M_c). \end{array} \right. \quad (1)$$

Условимся истинные значения параметров реального электропривода обозначать $R_{1o}, L_{1o}, R_{2o}, L_{2o}, M_{mo}, J_{\Sigma o}, M_{co}$, а оценки параметров – $R_1, L_1, R_2, L_2, M_m, J_\Sigma, M_c$.

При истинных значениях всех параметров система (1) принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_{1o} i_{1do} + L_{1o} \frac{di_{1do}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{2do}}{dt} - \omega_1 (L_{1o} i_{1qo} + M_{mo} i_{2qo}); \\ u_{1q} = R_{1o} i_{1qo} + L_{1o} \frac{di_{1qo}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{2qo}}{dt} + \omega_1 (L_{1o} i_{1do} + M_{mo} i_{2do}); \\ 0 = R_{2o} i_{2do} + L_{2o} \frac{di_{2do}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{1do}}{dt} - \omega_{2o} (L_{2o} i_{2qo} + M_{mo} i_{1qo}); \\ 0 = R_{2o} i_{2qo} + L_{2o} \frac{di_{2qo}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{1qo}}{dt} + \omega_{2o} (L_{2o} i_{2do} + M_{mo} i_{1do}); \\ J_{\Sigma o} \frac{d\omega_o}{dt} = p_n (p_n M_{mo} (i_{1qo} i_{2do} - i_{1do} i_{2qo}) - M_{co}), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $i_{1do}(t)$, $i_{1qo}(t)$, $i_{2do}(t)$, $i_{2qo}(t)$, $\omega_{2o}(t)$, $\omega_o(t)$ – функции, найденные при движении реального асинхронного двигателя.

На интервале времени $t \in [t_0, t_f]$ предполагаются известными функции $u_{1d}(t)$, $u_{1q}(t)$, $i_{1do}(t)$, $i_{1qo}(t)$ при движении реального электропривода с параметрами R_{1o} , L_{1o} , R_{2o} , L_{2o} , M_{mo} , $J_{\Sigma o}$, M_{co} . Требуется найти оценки этих параметров $R_1, L_1, R_2, L_2, M_m, J_{\Sigma}, M_c$ и оценку угловой скорости $\omega(t)$ [5].

Рассмотрим задачу на примере оценки сопротивления ротора R_2 . Если R_2 получит единичное приращение, которое считается малым, то уравнения ОЭМ примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_1(i_{1d} + \bar{i}_{1d}) + L_1 \frac{d(i_{1d} + \bar{i}_{1d})}{dt} + M_m \frac{d(i_{2d} + \bar{i}_{2d})}{dt} - \\ - \omega_1 (L_1(i_{1q} + \bar{i}_{1q}) + M_m(i_{2q} + \bar{i}_{2q})); \\ u_{1q} = R_1(i_{1q} + \bar{i}_{1q}) + L_1 \frac{d(i_{1q} + \bar{i}_{1q})}{dt} + M_m \frac{d(i_{2q} + \bar{i}_{2q})}{dt} + \\ + \omega_1 (L_1(i_{1d} + \bar{i}_{1d}) + M_m(i_{2d} + \bar{i}_{2d})); \\ 0 = (R_2 + 1)(i_{2d} + \bar{i}_{2d}) + L_2 \frac{d(i_{2d} + \bar{i}_{2d})}{dt} + M_m \frac{d(i_{1d} + \bar{i}_{1d})}{dt} - \\ - (\omega_2 + \bar{\omega}_2)(L_2(i_{2q} + \bar{i}_{2q}) + M_m(i_{1q} + \bar{i}_{1q})); \\ 0 = (R_2 + 1)(i_{2q} + \bar{i}_{2q}) + L_2 \frac{d(i_{2q} + \bar{i}_{2q})}{dt} + M_m \frac{d(i_{1q} + \bar{i}_{1q})}{dt} + \\ + (\omega_2 + \bar{\omega}_2)(L_2(i_{2d} + \bar{i}_{2d}) + M_m(i_{1d} + \bar{i}_{1d})); \\ J_{\Sigma} \frac{d(\omega + \bar{\omega})}{dt} = p_n [p_n M_m ((i_{1q} + \bar{i}_{1q})(i_{2d} + \bar{i}_{2d}) - \\ - (i_{1d} + \bar{i}_{1d})(i_{2q} + \bar{i}_{2q})) - M_c] \end{array} \right. \quad (3)$$

Малые приращения $\bar{i}_{1d}, \bar{i}_{1q}, \bar{i}_{2d}, \bar{i}_{2q}, \bar{\omega}, \bar{\omega}_2$ играют роль функций чувствительности переменных к изменению активного сопротивления R_2 , т.е.

$$\begin{aligned}\bar{i}_{1d} &= \frac{\partial i_{1d}(t)}{\partial R_2} = S(i_{1d}, R_2); \quad \bar{i}_{1q} = \frac{\partial i_{1q}(t)}{\partial R_2} = S(i_{1q}, R_2); \\ \bar{i}_{2d} &= \frac{\partial i_{2d}(t)}{\partial R_2} = S(i_{2d}, R_2); \quad \bar{i}_{2q} = \frac{\partial i_{2q}(t)}{\partial R_2} = S(i_{2q}, R_2); \\ \bar{\omega} &= \frac{\partial \omega(t)}{\partial R_2} = S(\omega, R_2); \quad \bar{\omega}_2 = \frac{\partial \omega_2(t)}{\partial R_2} = S(\omega_2, R_2).\end{aligned}\quad (4)$$

Вычитая из уравнений (3) уравнения (1), пренебрегая произведениями малых величин, получаем

$$\left\{ \begin{aligned}0 &= R_1 \bar{i}_{1d} + L_1 \frac{d\bar{i}_{1d}}{dt} + M_m \frac{d\bar{i}_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 \bar{i}_{1q} + M_m \bar{i}_{2q}); \\ 0 &= R_1 \bar{i}_{1q} + L_1 \frac{d\bar{i}_{1q}}{dt} + M_m \frac{d\bar{i}_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 \bar{i}_{1d} + M_m \bar{i}_{2d}); \\ -i_{2d} &= R_2 \bar{i}_{2d} + L_2 \frac{d\bar{i}_{2d}}{dt} + M_m \frac{d\bar{i}_{1d}}{dt} - \bar{\omega}_2 (L_2 \bar{i}_{2q} + M_m \bar{i}_{1q}); \\ -i_{2q} &= R_2 \bar{i}_{2q} + L_2 \frac{d\bar{i}_{2q}}{dt} + M_m \frac{d\bar{i}_{1q}}{dt} + \bar{\omega}_2 (L_2 \bar{i}_{2d} + M_m \bar{i}_{1d}); \\ J_\Sigma \frac{d\bar{\omega}}{dt} &= 0.\end{aligned}\right.\quad (5)$$

Уравнения (5) позволяют генерировать функции чувствительности по активному сопротивлению R_2 .

Определим скорости изменения оценки параметра R_2 :

$$\begin{aligned}\frac{dR_2}{dt} &= -\mu_{R_2} \left[\frac{\partial i_{1d}(t)}{\partial R_2} \Delta i_{1d} + \frac{\partial i_{1q}(t)}{\partial R_2} \Delta i_{1q} \right] = \\ &= -\mu_{R_2} \left[S(i_{1d}, R_2) \Delta i_{1d} + S(i_{1q}, R_2) \Delta i_{1q} \right],\end{aligned}\quad (6)$$

где μ_{R_2} – положительный коэффициент, определяющий скорость изменения оценки параметра, выбирается согласно характеру сигналов $i_{1d}(t), i_{1q}(t), \omega_1(t)$; $\Delta i_{1d}, \Delta i_{1q}$ – погрешности по токам статора.

Аналогично оцениваются остальные параметры.

Погрешности по токам статора вычисляются в соответствии с выражениями

$$\Delta i_{1d}(t) = i_{1d0}(t) - i_{1d}(t); \Delta i_{1q}(t) = i_{1q0}(t) - i_{1q}(t). \quad (7)$$

Оценка скорости ротора осуществляется с помощью уравнения движения электропривода, в которое помимо угловой скорости входят такие параметры как статический момент и суммарный момент инерции, поэтому в данном случае для качественной и устойчивой идентификации недостаточно информации. В связи с этим от оценки суммарного момента инерции приходится отказаться.

На основании предложенного математического описания разработана схема устройства оценивания параметров и скорости ротора асинхронного электродвигателя, схема которого показана на рис. 1.

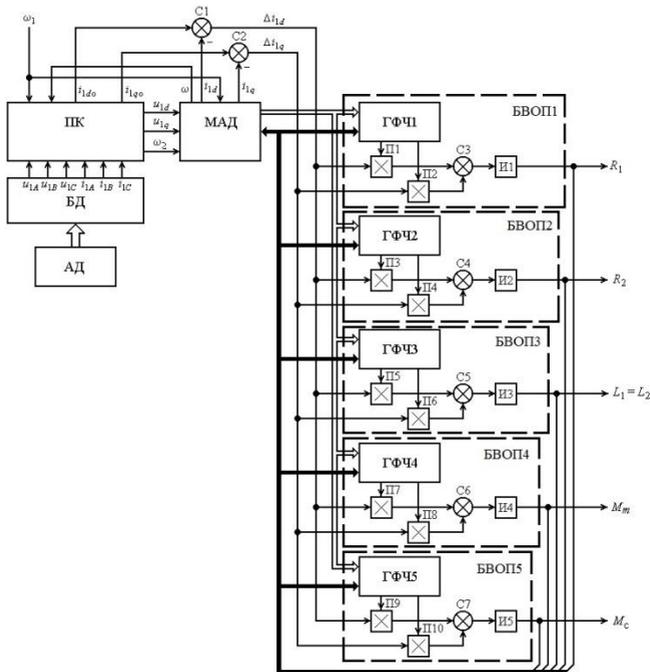


Рис. 1. Устройство оценивания параметров и процессов асинхронного электродвигателя

На рис. 1 используются следующие обозначения: трехфазный асинхронный электродвигатель (АД), блок датчиков (БД), блок преобразования координат (ПК), настраиваемую модель асинхронного электродвигателя (МАД) и блоки вычисления оценок параметров (БВОП).

В процессе функционирования АД в БД вырабатываются сигналы фазных напряжений u_{1A} , u_{1B} , u_{1C} и токов i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} статора. В блоке ПК выполняется преобразование фазных напряжений и токов статора в напряжения u_{1d} , u_{1q} и токи i_{1d} , i_{1q} ОЭМ, осуществляется вычисление угла поворота системы координат α_1 путем интегрирования сигнала частоты вращения ω_1 . В МАД заложено математическое описание в виде системы уравнений баланса напряжений для фаз статора и ротора ОЭМ и уравнение движения. Численное решение МАД позволяет получить функции $i_{1d}(t)$, $i_{1q}(t)$, $i_{2d}(t)$, $i_{2q}(t)$, $\omega(t)$, таким образом, в МАД осуществляется оценка параметров схемы замещения фазы и частота вращения асинхронного электродвигателя. БВОП включают в себя генератор функций чувствительности (ГФЧ), умножители, сумматоры, интеграторы и путем генерирования функций чувствительности осуществляют оценку параметров асинхронного электродвигателя.

Устройство идентификации, позволяющее оценивать параметры, переменные величины и частоту вращения асинхронного электродвигателя защищено патентом РФ на изобретение №2543495 [6].

Выводы

Предлагаемое устройство идентификации позволяет осуществлять идентификацию параметров схемы замещения и частоты вращения асинхронного двигателя. Оно может найти применение в адаптивных и самонастраивающихся системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В.Г. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя / В.Г. Макаров // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2010. – № 3–4. – С. 88–101.

2. Пат. 2392731 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров электродвигателя / В.Г. Макаров, А.Ю. Афанасьев, Ю.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. – №2009118685/09; заявл. 18.05.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.

3. Пат. 2426219 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров асинхронного двигателя / В.Г. Макаров, А.Ю. Афанасьев, Ю.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. – № 2010112365/07; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.

4. Макаров В.Г. Обзор методов бездатчикового определения скорости асинхронных двигателей / В.Г. Макаров, В.В. Тамбов // Машиностроение: Сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1 – С. 34–38.

5. Макаров В.Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю / В.Г. Макаров // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2009. – № 11–12. – С. 84–97.

6. Пат. 2543495 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 23/14. Устройство оценивания параметров и процессов асинхронного электродвигателя / А.Ю. Афанасьев, В.Г. Макаров, В.В. Тамбов, Р.Х. Бариев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНИТУ». – № 2013146768/07; заявл. 18.10.2013; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7.

Авторы:

Макаров Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, зав. каф. ЭиЭ ФГБОУ ВО «КНИТУ». Закончил факультет управления и автоматизации КГТУ в 1994 году. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальным управлением по критерию энергосбережения». E-mail: electroprivod@list.ru.

Бариев Рамис Халимович, аспирант ФГБОУ ВО «КНИТУ». Закончил факультет управления и автоматизации ФГБОУ ВО «КНИТУ» в 2015 году. E-mail: ramisb1990@mail.ru.

VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ПРЕЦЕДЕНТНОМ ПОДХОДЕ, НА ПРИМЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОАО РЖД

Лыкова М.П., Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

***Аннотация.** В данной статье описан прецедентный подход и действие экспертных систем. Также перечислены примеры использования экспертных систем в экономике на примере деятельности ОАО РЖД. Экспертные системы на основе прецедентного подхода могут стать прекрасным дополнением к существующим.*

***Ключевые слова:** экспертные системы, прецедентный подход, железная дорога, информационные технологии*

Экспертные системы (ЭС) – это компьютерные системы, которые предназначены для частичной замены специалиста-эксперта в разрешении проблемной ситуации. По сути – это программа, которая может накапливать знания экспертов и использовать их в дальнейшем для обеспечения высокоэффективного решения неформализованных задач в узкой предметной области. В основе ЭС лежит база знаний (БЗ) о предметной области, которая способна накапливаться в процессе построения и эксплуатации ЭС. [1]

Основным достоинством таких систем является умение накапливать знания и хранить их долгое время. К решению каждой задачи такие системы подходят объективно, это улучшает качество проводимого анализа. Экспертные системы могут решать задачи, требующие обработки большого количества знаний методом перебора, и при этом свести вероятность ошибки к минимуму.

Есть множество областей, в которых применяются экспертные системы. Эти системы основаны на знаниях, соответствен-

но могут применяться во многих сферах жизни общества. Сейчас их можно отнести к нескольким основным группам: экономика, медицина (проведение диагностики), контроль и управление, диагностика неисправностей в механических и электрических устройствах, обучение. [1]

Одно из перспективных направлений развития в области искусственного интеллекта является процесс получения правдоподобных суждений на основе уже имеющейся накопленной информации. Повторное использование информации (опыта решения схожих задач) позволяет уменьшить время, затрачиваемое на решение новой проблемы, улучшить качество принимаемого решения. Существует ряд подходов к принятию решений на основе правдоподобных рассуждений, включая принятие решения на основе индукции, абдукции, аргументации, аналогии, прецедентов. Реализация этих подходов позволяет разрабатывать разнообразные интеллектуальные системы поддержки принятия решений.

Одним из известных подходов к решению новых задач является выработка решения на основе прецедентов (ранее накопленного опыта решения похожих задач).

Прецедентный подход (Case-based reasoning) – это процесс (методология) решения проблемы через использование и возможную адаптацию уже имеющихся решений подобных проблем, которые возникали ранее. Прецедентный подход позволяет упростить процесс принятия решений в условиях ограниченного времени и при наличии различного рода неопределенности в исходных данных и экспертных знаниях, а также в случае возникновения различных аварийных (аномальных) ситуаций.

Суть подхода в том, что знания по решению определенных задач накапливаются в системе и, если происходит подобная проблема, то решается она намного быстрее, чем в первый раз. Подход базируется на понятии прецедент — случай или событие, имевшее место в прошлом и служащее примером или основанием для последующих действий в настоящем. В основном прецедент включает в себя описание ситуации и алгоритм тех действий, которые привели к решению проблемы. [2]

СВР-системы, основанные на прецедентном подходе, уже активно используются в разных сферах жизни человека (меди-

цина, юриспруденция, техника и тд). Также прецедентный подход начали активно применять в динамических информационных системах, в системах экспертного диагностирования, в информационных системах поддержки принятия решений, системах машинного обучения, при решении задач прогнозирования, обобщения накопленного опыта, поиска решения в малоизученных предметных областях и др. С экономической точки зрения такие системы удобны тем, что на них можно обучать поведению в аварийных ситуациях молодых специалистов. Тогда при возникновении реальной ситуации ущерб от нее будет минимальным.

В данном методе есть четыре основных этапа, которые образуют CBR-цикл: Retrieve - извлечение наиболее соответствующего прецедента для сложившейся ситуации из библиотеки прецедентов; Reuse - повторное использование извлеченного прецедента для попытки решения текущей проблемы; Revise - пересмотр и адаптация в случае необходимости полученного решения в соответствии с текущей проблемой; Retain - сохранение вновь принятого решения как части нового прецедента.

Приведем пример того, как экспертные системы применяются в ЖД.

1) Экспертная система Северо-Муйского тоннеля (ЭС СМТ) была разработана для Восточно - Сибирской железной дороги и является частью системы поддержки эксплуатации, осуществляющая высококвалифицированную интеллектуальную помощь специалистам, обслуживающим тоннель.

Экспертная система обеспечивает: использование качественной информации для принятия решений по вопросам эксплуатации, сгенерированной на основе экспертных знаний; количественную информацию, позволяющую экстраполировать поведение объекта управления (СМТ).

Как видно из описания основных функций работы данной системы и приведённого выше описания прецедентного подхода можно сделать вывод, что такой подход прекрасно подошел бы для проектирования подобных экспертных систем. Знания экспертов в области аварийных ситуации и способов их решения легли бы в основу базы прецедентов. На основе нее система сможет принимать решения, быстро анализируя и выдавая алго-

ритм действия в подобных или таких же ситуациях, это сократит расходы и потери. [3]

Плюс использования прецедентного подхода в том, что система перебирает все возможные случаи, она не может что-то упустить или забыть, как человек, что сильно уменьшает вероятность ошибки. Также база знаний системы состоит из опыта нескольких людей, а не одного. Это увеличивает качество анализа ситуации.

2) Одной из самых важных задач на ЖД является необходимость в постоянной диагностике и мониторинге реального технического состояния ЖД инфраструктуры. В настоящий момент все обследования, инспекции и т. д. не могут обеспечить оперативное получение достоверных и достаточных знаний о реальном техническом состоянии путей и иных конструкций. Для полноценного и постоянного контроля за такими объектами необходима система, которая на основе имеющихся у нее знаний могла бы спрогнозировать дальнейшее изменение состояния конструкции под влиянием различных воздействий. Сейчас уже существует такая система, которая называется «Интеллектуальная система контроля напряженно-деформированных состояний» (ИСКНДС), она разрабатывается в Ростове. Система оснащена датчиками, которые передают основные данные об объектах. Это могут быть датчики вибрации, потока газа, температуры, освещенности и т.д. Все эти данные собираются и передаются эксперту, для дальнейшей обработки и анализа состояния. Решения, принимаемые экспертом, носят интуитивный характер, они основаны на знаниях и опыте человека.

На такой экспертной системе тоже можно применить прецедентный подход. Базу знаний составят знания нескольких экспертов и специалистов, а не одного. Можно внести в систему оптимальные данные для каждого датчика. Также задать, что делать, если значения одного или нескольких датчиков выходит за грань. В систему нужно внести четкие алгоритмы действий при той или иной ситуации. Тогда, при возникновении неисправностей, система будет сама анализировать все возможные аварийные ситуации и выдавать решение проблемы. Если же прецедентов таких еще не было, то система выдаст похожие случаи, а эксперты уже определит алгоритм действий. После

решения проблемы прецедент будет внесет в базу и дополнит ее на будущее.

Выводы

Применение экспертных систем, основанных на прецедентном подходе для анализа ЖД объектов, может в значительной мере снизить вероятность аварий. Все неисправности система будет видеть заранее и сразу же выдавать алгоритм для их исправления. Основным требованием к такой системе должна быть простота использования, так как не все знакомы с языками программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспертные системы: назначение, область применения [Электронный ресурс] // URL: <https://megaobuchalka.ru/3/12946.html> (дата обращения: 16.10.20)
2. Введение в метод рассуждений по прецедентам [Электронный ресурс] // URL: http://systematy.ru/articles/vvedenie_v_metod_rassujdeniy_po_pretsedentam (дата обращения: 18.10.20)
3. Экспертная система СМТ для Восточно-Сибирской железной дороги [Электронный ресурс] // URL: <http://vgroup.ru/SMT> (дата обращения: 19.10.20)

Авторы:

Лыкова Мария Павловна, студент 4 курса факультета «Бизнес-информатика» Сибирского государственного университета путей сообщения. E-mail: mrl0904@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

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

***Аннотация.** Проанализированы и обобщены основные факторы, которые необходимо учитывать в системах принятия оптимальных управленческих решений в социально-экономической сфере. Предложенные алгоритмы повысят эффективность принимаемых решений, например, позволят своевременно выявить нежелательные тренды, способные негативно отразиться на пространственно-временной эволюции социально-экономической системы.*

***Ключевые слова:** принятие решений, прогнозирование, территориальное распределение населения, мобильность населения, устойчивое развитие, миграция, математическое моделирование, социально-экономическая система, агломерация.*

Разработка, обоснование и развитие адекватных математических методов, позволяющих выявить и всесторонне исследовать тенденции пространственно-временной эволюции больших и сложных социально-экономических систем (регионы, страны, межгосударственные объединения) относятся к числу тех научных проблем, которые являются первоочередными и важнейшими в обеспечении устойчивого развития как отдельных регионов, так и мирового сообщества [1-13]. Результатом решения перечисленных задач будет создание адекватных инструментов, позволяющих заранее выявить нежелательные тенденции в пространственно-временной эволюции больших социально-экономических систем, проанализировать возможные причины их появления, а также принять меры по минимизации ущерба от них. Таким образом, результаты исследования имеют непосредственное отношение к разработке эффективных систем принятия оптимальных управленческих решений в социально-экономических системах. Решение такой задачи тесно связано с

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-010-00631

применением, а также дальнейшим развитием методов и технологий обработки и анализа больших объёмов данных (Big Data). Важной составной частью систем, обеспечивающих принятие оптимальных управленческих решений, является программное обеспечение, реализующее методы анализа и обобщения больших объёмов исходных данных, в том числе интеллектуальные. При работе с большими объёмами данных, относящимися к различным аспектам существования и функционирования социально-экономических систем, применение математических методов часто затруднено тем, что в настоящее время отсутствуют однозначные законы со строгими математическими формулировками, описывающие подобные системы. Следует отметить, что в этом направлении в настоящее время достигнут существенный прогресс, в частности, для физических, биологических и технических систем. Например, известны фундаментальные законы со строгими математическими формулировками – законы Ньютона, Кулона, Ома и т.д. Необходимо также иметь в виду, что многие математические модели, разрабатываемые в настоящее время для анализа динамики социально-экономических систем, являются переопределёнными, т.е. количество параметров, которые должны быть идентифицированы с использованием достоверных данных экспериментальных исследований / наблюдений, либо данных статистики, значительно превышает число уравнений.

Корректно построенная математическая модель важна в исследованиях социально-экономических систем, так как она отражает гипотезу об основных факторах их развития, выраженных, в частности, в показателях удовлетворенности социальными потребностями. На их основе возможно, например, прогнозирование финальных результатов эволюции тех или иных тенденций и процессов, имеющих место в социально-экономических системах. Математические методы исследования социально-экономических систем составляют, в частности, базу для учёта в процессе разработки и реализации реформ наиболее проблемных с точки зрения развития системы явления, тренды и процессы, которые могут быть как непосредственными целями государственной реформы, так и источниками рисков. Выявление основных тенденций, определяющих динамику социально-

экономической системы и формирующих её дальнейший путь эволюции, представляет собой ключевой компонент при принятии тех или иных управленческих решений. Возможность предсказать до принятия решения нежелательные и неуправляемые аспекты процессов и трендов позволяет сделать наиболее оптимальный выбор.

В данной работе всесторонне проанализировано и обобщено многообразие факторов, которые необходимо учитывать при разработке системы принятия оптимальных управленческих решений. Важными являются задачи оптимального территориального размещения новых производств; прогнозирования требуемой в ближайшей перспективе численности экономически активного населения и трудовых мигрантов на тех или иных территориях; определения эффективности предоставления субсидий как из федерального, так и из регионального бюджетов для дальнейшего развития и обустройства населённых пунктов; оценки эффективности развития транспортной сети для перевозок населения от места проживания до места работы и обратно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.В., Семёнов М.И. Создание и использование системы обработки и анализа данных с применением пакета Matlab // Прикладная информатика. 2008. №2 (14). С. 85-92.

2. Андреев В.В., Семёнов М.И. Программное приложение для решения задач оптимальной параметрической идентификации динамических моделей: применение для прогнозирования динамики социально-экономической системы США // Прикладная информатика. 2010. №2 (26). С. 46-57.

3. Андреев В.В., Семёнов М.И. Математическое моделирование и исследование динамики социально-экономической системы (на примере США) // Нелинейный мир. 2010. Т.8, №3. С. 189-195.

4. Андреев В.В., Семёнов М.И. Математическое моделирование динамики социально-экономической системы США // Нелинейный мир. 2012. Т. 10, №5. С. 322-330.

5. Андреев В.В., Семёнов М.И. Математическое моделирование динамики социально-экономической системы России: определение наилучшего пути развития // Нелинейный мир. 2013. Т.11, №1. С. 58-72.

6. Andreev V.V. On the validity of use of physical equations and principles in the socio-economic field and on the predictability of socio-

economic system dynamics // *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*. 2015. V. 20, №1. P. 82-98.

7. *Andreev V.V.* Will there be a revolution in Russia in 2017? // *Journal of Policy Modeling*. 2015. V. 37. P. 782-788.

8. *Andreev V.V.* Features of Territorial Distribution of Population in Russia // In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.) *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. V. 1295. Springer, Cham. P. 541-553.

9. *Andreev V.V.* Study of Development of the Largest Now Russian Cities Since the End of XIX Century to the Present Time // In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.) *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. V. 1295. Springer, Cham. P. 554-566.

10. *Андреев В.В.* Территориальное распределение населения в Российской Федерации // *Экономика региона*. 2017. Т. 13, № 3. С. 803-811.

11. *Андреев В.В.* Анализ территориального распределения населения в субъектах Северо-Кавказского федерального округа // *Российский экономический интернет-журнал*. 2019. № 3. Ссылка на статью: <http://www.e-rej.ru/Articles/2019/Andreev.pdf>.

12. *Андреев В.В.* Территориальное распределение населения в субъектах Дальневосточного федерального округа // *Российский экономический интернет-журнал*. 2019. № 4. Ссылка на статью: http://www.e-rej.ru/Articles/2019/Andreev_V.pdf.

13. *Андреев В.В., Лукиянова В.Ю., Кадышев Е.Н.* Анализ территориального распределения населения в субъектах Приволжского федерального округа с применением законов Ципфа и Гибрата // *Прикладная эконометрика*. 2017. № 4 (48). С. 97-121.

Авторы:

Андреев Всеволод Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил 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.

ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ МИЛАНДР В АВТОМАТИКЕ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

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

***Аннотация.** Микроконтроллеры занимают важное место в современных системах автоматизации, электроники, радиотехники и электроэнергетики. Подготовку инженеров по этой специальности предлагается вести на базе отечественных микроконтроллеров Миландр (г. Зеленоград). В работе рассматриваются основные характеристики отладочных плат и программаторов, методика их программирования.*

***Ключевые слова:** микроконтроллеры, программирование, электроэнергетика, электроника, автоматика.*

Импортозамещение в Российской электротехнической полупроводниковой промышленности пока достаточно скромное. Выпускаются отечественные программируемые логические контроллеры (ПЛК) в Москве (Овен), Чебоксарах (Волмаг), микропроцессоры (Эльбрус), устройства релейной защитной автоматики (РЗА) в Чебоксарах. И вот настала очередь микроконтроллеров (МК): АО «ПКК Миландр» специализируется на выпуске микроконтроллеров, микропроцессоров, микросхем памяти, интерфейсов, преобразователей напряжения, радиочастотных и электронных модулей, приборов промышленного, коммерческого и специального назначения. Кроме того, Миландр разрабатывает программное обеспечение для современных информационных систем и изделий микроэлектроники.

В сентябре 2021 году кафедре автоматики и управления в технических системах (зав. каф. проф., д.т.н. Охоткин Г.П.) были переданы отладочные платы МК Миландр с программаторами в количестве 10 ед. АО НПП «ЭЛАРА» (генеральный директор Углов А.А.). Данные устройства применяются в курсах «Основы микропроцессорной и микроконтроллерной техники», «Электронные устройства на базе микроконтроллеров».

АО «ПКК Миландр» выпускает целое семейство микроконтроллеров на базе лицензии, приобретенной в 2008 году у компании ARM. Наши отладочные платы основаны на 32-

разрядном МК K1986BE91T1 (или 92QI), содержащем в себе несколько ядер Cortex-M3 [1] и следующие интерфейсы:



Рис. 1. Отладочная плата Миландр

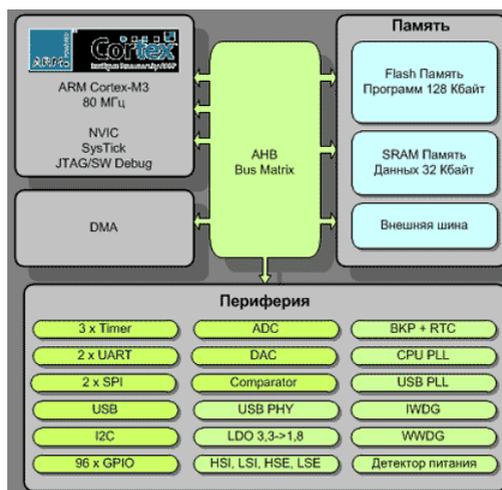


Рис. 2. Интерфейсы отладочной платы Миландр

Характеристики микроконтроллеров серии 1986BE9х:

- ядро:
 - 32-битное RISC-ядро Cortex™-M3, тактовая частота 80 МГц;
 - производительность 1.25 DMIPS/МГц (Dhrystone 2.1);

- блок аппаратной защиты памяти MPU;
- умножение за один цикл, аппаратная реализация деления;
- память:
 - флеш-память для программ 128 Кб;
 - оперативная память для данных 32 Кб;
- питание и тактовая частота:
 - внешнее питание 2,2÷3,6 В;
 - встроенный регулируемый стабилизатор напряжения на 1,8 В;
 - тактовые генераторы 8 МГц и 40 кГц;
 - внешние кварцевые резонаторы на 2÷16 МГц и 32 кГц;
- аналоговые модули:
 - два 12-разрядных АЦП (до 16 каналов);
 - температурный датчик;
 - двухканальный 12-разрядный ЦАП;
 - компаратор;
- периферия:
 - контроллер прямого доступа к памяти DMA;
 - два контроллера сетевого интерфейса CAN;
 - контроллеры интерфейсов USB, UART, SPI, IIC;
 - три 16-разрядных таймер-счетчика с функциями ШИМ и регистрации событий;
 - до 96 пользовательских линий ввода-вывода;
- отладочные интерфейсы:
 - последовательные интерфейсы SWD и JTAG.

Архитектура системы памяти за счет матрицы системных шин позволяет минимизировать возможные конфликты при работе системы и повысить общую производительность. Контроллер DMA позволяет ускорить обмен информацией между ОЗУ и периферией без участия процессорного ядра.

Программирование МК ведется в интегрированной среде разработки Keil uVision на языке Си, среди основных возможностей которой можно отметить:

- 1) базу данных микроконтроллеров, содержащую подробную информацию обо всех поддерживаемых устройствах;
- 2) менеджер проектов, служащий для объединения отдель-

ных текстов программных модулей и файлов группы, обрабатываемые по единым правилам;

3) встроенный редактор кода с подсветкой синтаксиса;

4) средства автоматической компиляции, ассемблирования и компоновки проекта, предназначенные для создания исполняемого модуля программы;

5) отладчик-симулятор, демонстрирующий работу программы на виртуальной модели микропроцессора.

Для начала работы необходимо установить USB-драйвер программатора J-Link и библиотеки поддержки микроконтроллера. При настройке проекта выбираем тип МК и программатора [2].

Библиотеки MDR32F9Qx позволяют абстрагироваться от архитектуры (регистров, команд ассемблера) и программировать с помощью сервисных функций и записи данных в порты ввода-вывода с активным использованием структур данных. Каждая программа обычно содержит бесконечный цикл while(1).

Выводы

МК Миландр применяется на факультете радиоэлектроники и автоматики в учебном процессе и научной деятельности студентов специальностей 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника», 27.03.04 «Управление в технических системах», 11.03.01 «Радиотехника».

Подготовка инженеров на базе отечественных микроконтроллеров Миландр оказывает большое влияние на их профессиональное становление с использованием математических методов и программирования [3]. Будущие бакалавры и магистры активно применяют микроконтроллеры в ходе учебно-производственных практик на предприятиях электротехнической отрасли, а также в выпускных квалификационных работах и проектной деятельности [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Огородников И.Н.* Микропроцессорная техника: введение в Cortex-M3: учеб. пособие / И.Н. Огородников.– Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015.– 116 с.

2. *Алалуев Р.В.* Основы программирования 32-разрядных микроконтроллеров 1986VE91T компании «Миландр»: руководство к выполнению лабораторных работ / Р.В. Алалуев, В.М. Глаголев, А.А. Мосур, Л.Л. Владимиров.– М., 2017. – 128 с.: ил.

3. *Елисеева В.В., Картузова Т.В., Чернышев И.В.* Применение преобразования Фурье к задачам электроэнергетики / В.В. Елисеева, Т.В. Картузова, И.В. Чернышев // Математические модели и их приложения: сборник научных трудов. Чебоксары, 2010. – Издательство: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова (Чебоксары) – С. 363–370.

4. *Картузов А.В.* Система сбалансированных показателей качества учебного процесса в вузе / А.В. Картузов // Ярославский педагогический вестник: Психолого-педагогические науки = Yaroslavl pedagogical bulletin: научный журнал. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2011. – № 2. – Том II (Психолого-педагогические науки). – С. 146–149.

5. *Картузов А.В.* Мониторинг качества учебного процесса в условиях информатизации / А.В. Картузов – Вестник Чебоксарского кооперативного института. – 2010. – № 1 (5). – С. 217–221.

Авторы:

Картузов Александр Вячеславович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах ЧГУ. В 1989 году закончил электротехнический факультет ЧГУ. В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата педагогических наук по теме «Использование информационно-образовательных ресурсов вуза в формировании профессиональной подготовки специалиста» по специальности «Теория и методика обучения и воспитания (математика)». E-mail: kartuzovaleksandr@yandex.ru.

Картузова Татьяна Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре высшей математики, доцент кафедры высшей математики и теоретической механики им. С.Ф. Сайкина ЧГУ. В 1989 году закончила физико-математический факультет ЧГУ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» «Численные исследования обтекания системы произвольных профилей методом граничных элементов» защищена 25.12.1997. E-mail: tanyakartuzova@yandex.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА.....	3
<i>Кондрашов Н.С., Богданов А.В., Попов Соловьева С.Н.</i> Автоматизированная сегментация осциллограмм аварийного происшествия.....	3
<i>Воробьев Е.С., Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Антонов В.И., Солдатов А.В.</i> Алгоритмы блокировки при неисправностях цепей напряжения. Одновременный мониторинг напряжений и токов.....	9
<i>Воробьев Е.С., Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Антонов В.И., Солдатов А.В.</i> Алгоритмы блокировки при неисправностях цепей напряжения. Сравнение напряжений звезды и разомкнутого треугольника.....	16
<i>Иванова В.Р.</i> Интернет вещей – цифровая технология для обеспечения полного спектра цифровых услуг.....	21
<i>Миرونенко Я.В.</i> Использование в диагностике высоковольтного энергетического оборудования алгоритмов машинного обучения.....	25
<i>Андреев О.Н.</i> Использование нейронной сети в скользящем временном окне для оценки параметров тока.....	31
<i>Иванов В.А., Дементий Ю.А.</i> Исследование влияния паразитных параметров контура нулевой последовательности на точность измерения расстройки компенсации ёмкостного тока.....	38
<i>Золотов А.А., Петряшин И.Е.</i> Классификация сигналов с помощью нейронных сетей.....	44
<i>Дементий Ю.А., Иванов В.А.</i> Метод построения объектной характеристики релейной защиты и кривой абсолютной нераспознаваемости защищаемого объекта.....	48
<i>Пилюгин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н.</i> Моделирование синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия.....	55
<i>Иванов В.Н., Михайлов А.Л.</i> Моделирование экранирования корпусов приборов в программной среде TALGAT.....	60
<i>Фёдоров А.О., Петров В.С., Ивахно Д.О.</i> Новый способ одностороннего волнового определения места повреждения.....	65

<i>Еремеев Н.А.</i> О возможностях использования нейросетевых алгоритмов для разработки систем управления бесколлекторными двигателями	71
<i>Дементий Ю.А., Николаев К.П.</i> Обучение защиты генератора от однофазного замыкания на землю в режиме электроторможения	75
<i>Воронов П.Л., Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А.</i> Определение основных характеристик узлов нагрузки при одновременных изменениях частоты и напряжения	81
<i>Петряшин И.Е., Золотов А.А.</i> Определение структуры электрического сигнала при помощи нейросетей.....	87
<i>Кокшев П.А.</i> Особенности применения сетевого анализатора данных в цифровой подстанции и его возможности	93
<i>Клочкова Н.Н., Гречушкин Д.В.</i> Отслеживание частичного разряда трансформатора с помощью оптоволоконных датчиков	97
<i>Дементий Ю.А., Николаев К.П.</i> Применение метода обнаружения аномалий для определения сбоя работы автоматики дугогасящего реактора.....	105
<i>Быков К.В., Павлов Ю.В., Лазарева Н.М.</i> Трехуровневый конвертор для собственных нужд станций и подстанций	111
<i>Кинев Е.С., Тягин А.А., Хороших А.А., Колодочкин М.Д., Пантелеев В.И.</i> Улучшение электромагнитной обстановки в цеховой сети применением цифрового управления силовыми вентилями	116
<i>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.</i> Управление пропускной способностью кабельной сетью на основе интеллектуально-информационных технологий	122
<i>Попов С.О., Антонов А.С., Южаков В.Ю., Захарова Е.В.</i> Цифровая модель электромагнитного преобразователя для диагностических систем.....	128
<i>Галанина Н.А., Петров С.В.</i> Цифровая подстанция по МЭК 61850: объектно-ориентированный подход, преимущества ЦПС.....	135
II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА.	
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ	
<i>Морозов Д.С., Пазушкина О.В.</i> Направления повышения экономичности котельной промышленного предприятия.....	141

<i>Серебрянников А.В., Матвеев Н.В., Краснов Е.В.</i> Передаточные функции различных видов нагревателей и нюансы настройки ПИД-регулятора для подобных объектов регулирования.....	146
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А., Туманов Ю.А.</i> Повышение эффективности работы ТЭЦ за счет снижения температуры обратной сетевой воды	151
<i>Марченко А.В., Захаров А.А.</i> Разработка способа по утилизации теплоты от холодильных машин	157
<i>Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Афанасьев В.В.</i> Уменьшение вредных выбросов при газификации твердых видов топлив	161
III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	169
<i>Тумаева Е.В., Афлятунов И.Ф., Кузин С.С.</i> Автоматизированный электротехнический комплекс группы асинхронных двигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств	169
<i>Плотников Ю.В.</i> Аппаратная часть системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока... ..	175
<i>Синица М.К., Михайлов С.А., Хренников А.Ю.</i> Информационно- измерительная система оценки технического состояния силовых трансформаторов	182
<i>Архинов А.В., Еремеев Н.А., Екантиев А.И.</i> Исследование возможностей совершенствования внутреннего контура системы управления электроприводом постоянного тока.....	188
<i>Малафеев С.И., Малафеева А.А.</i> Контроль сопротивления изоляции в системе IT распределения электроэнергии.....	194
<i>Петров В.Н., Свинцов Г.П., Фролов С.И.</i> Математические аспекты расчета магнитной проводимости рабочего зазора при неравномерном магнитном поле	201
<i>Исхаков Р.Р.</i> Модернизация систем управления электроприводами шахтных подъемных машин	209
<i>Галиева Т.Г., Назарова А.Д., Иванов Д.А.</i> Особенности дефектов в высоковольтных изоляторах	211
<i>Грабчак Е.П., Логинов Е.Л.</i> Повышение живучести ЕЭС России на основе мониторинга воздействия электромагнитных импульсов на энергетические объекты.....	217

<i>Михеев Г.М., Зиганин А.Г., Касымов Р.И.</i> Применение системы «БАЙПАС» на ВЛ 6(10) кВ	224
<i>Гурьев В.К., Иванова С.П.</i> Пути повышения надёжности и энергоэффективности электромагнитных электрических аппаратов	229
<i>Зайцев Ю.В., Мирошниченко А.Ю., Ковзик Н.С.</i> Силовые конденсаторы на самовосстанавливающихся полимерах	235
IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ	240
<i>Мицкевич Р.В., Рубан Н.Ю., Рудник В.Е., Бай Ю.Д.</i> Анализ влияния настроек систем управления силовых преобразователей фотоэлектрических электростанций на маневренные характеристики энергосистемы	240
<i>Виролайнен А.В.</i> Вопросы развития распределённой генерации в России	247
<i>Генин В.С., Васильева Л.Н., Шарафутдинов Н.Р., Артыкаева Э.М.</i> Использование SCADA-системы TRACE MODE для контроля СКН по ваттметрограмме.....	252
<i>Зайцев Ю.В., Мирошниченко А.Ю., Ковзик Н.С.</i> Многофункциональная электрическая лампа	262
<i>Лыков Ю.Ф.</i> Надёжность питания собственных нужд подстанций ...	267
<i>Пазушкина О.В., Абайдуллина Ю.Р., Абрамов А.В.</i> Нетрадиционный способ переработки бумажно-целлюлозной продукции.....	273
<i>Малькова Я.Ю., Уфа Р.А.</i> Определение оптимальных параметров совместно устанавливаемых объекта возобновляемой генерации и накопителя энергии	277
<i>Степушин Д.В., Пазушкина О.В.</i> Проблема использования ветрогенераторов в северной части России.....	283
<i>Тошходжаева М.И., Комилова М.Ё.</i> Проблемы совместной работы малых источников с энергосистемой.....	289
<i>Корнеев А.П., Niu Yitong.</i> Разработка алгоритма слежения за траекторией движения солнца для получения максимума солнечного излучения	294
<i>Латышов А. Ю., Марченко А.В.</i> Разработка энергосберегающего решения в системах водоснабжения	300
<i>Александров Н.М., Зарубин Д.В., Хренников А.Ю.</i> Расчет электродинамических сил в обмотках силовых трансформаторов	303

<i>Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Спиридонова А.С., Шарафутдинов Н.Р.</i> Решение задач диагностики электрических машин с использованием SCADA-системы	311
<i>Петров Д.А., Позин Д.О.</i> Современное состояние в области применения тренажеров по оперативным переключениям	320
<i>Орлов М.Е., Хисаметдинова А.Ш., Халиуллов Д.С.</i> Усовершенствование традиционных способов сжигания твердого топлива.....	325
<i>Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А., Рен Д.</i> Эффективность функционирования мульти-агентной микроэнергосистемы.....	332
V. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ	339
<i>Колесник М.Б., Иванов С.Н.</i> Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках.....	339
<i>Ильгачёв А.Н.</i> Влияние геометрических параметров электродов и ванны двухэлектродной печи на её токи «звезды» и «треугольника».....	345
<i>Михеев Г.М., Свешников А.Г.</i> Вопросы выявления утечки воды в разных системах водоснабжения	351
<i>Мочалов Н.С., Ярославский Д.А., Нгуен В.В.</i> Модернизированная система мониторинга ЛЭП посредством внедрения метода определения стрелы провеса провода.....	355
<i>Хамидуллин И.Н.</i> Применение автоматизированной системы управления наружным освещением	360
<i>Назаров М.А., Хренников А.Ю.</i> Проблемы внедрения энергоэффективных трансформаторов собственных нужд	365
<i>Лавриненко В.А., Николаев Д.В.</i> Разработка и исследование электропривода центробежного насоса с конденсаторным асинхронным двигателем	369
<i>Петросов Ю.М., Михадаров Д.Г., Леонов В.В.</i> Ремонтпригодная головка электрододержателя	376
<i>Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А.</i> Синхронный двигатель с удвоенной частотой вращения ротора.....	383
<i>Калинин А.Г., Ильин С.А., Андреев В.А., Семенов Л.А., Андреева Т.В.</i> Система электропривода и алгоритм полуавтоматической сварки трением с перемешиванием	390

Макаров В.Г., Бариев Р.Х. Устройство оценивания параметров и скорости ротора асинхронного электродвигателя 397

VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ 404

Лыкова М.П. Использование экспертных систем, основанных на прецедентном подходе, на примере деятельности ОАО РЖД 404

Андреев В.В. Исследование закономерностей пространственно-временной эволюции социально-экономических систем 409

Картузов А.В., Картузова Т.В. Программирование микроконтроллеров МИЛАНДР в автоматике и радиоэлектронике . 413

Научное издание

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

Материалы V 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 01.12.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 24,64. Уч.-изд. л. 16,00.
Тираж 300 экз. Заказ № 1284

Отпечатано в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15