



КГЭУ

ЛЕТ ДВИЖЕНИЯ ВПЕРЕД

## СБОРНИК ТРУДОВ

ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»



20-21 марта 2019 г., Казань



ФСК



ЕЭС



РОССЕТИ



АО «СО ЕЭС»



КГЭУ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Министерство образования и науки Республики Татарстан  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Материалы  
Всероссийской научно-практической конференции

20–21 марта 2019 г.

Казань  
2019

УДК 621.3  
ББК 31.2  
П78

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «КГЭУ» И.В. Ившин  
доктор технических наук, профессор филиала ФГБОУ ВО «УГНТУ»  
в г. Салават Р.Г. Вильданов

Редакционная коллегия:

Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор), Э.В. Шамсутдинов,  
Н.В. Роженцова, В.Р. Иванова

**П78 Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники:** матер. Всерос. науч.-практ. конф. (Казань, 20–21 марта 2019 г.) / редкол.: Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор) и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – 524 с.

ISBN 978-5-89873-540-1

Опубликованы материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» по следующим научным направлениям:

1. Проектирование и эксплуатация объектов электроэнергетики.
2. Энерго- и ресурсосбережение промышленных и коммунальных предприятий.
3. Энергосиловое оборудование, электропривод и автоматизация.
4. Малая энергетика, возобновляемые источники энергии.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в сфере энергетики, а также для студентов вузов энергетического профиля.

Материалы докладов публикуются в авторской редакции. Ответственность за их содержание возлагается на авторов.

УДК 621.3  
ББК 31.2

ISBN 978-5-89873-540-1

© Казанский государственный  
энергетический университет, 2019

## Секция 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.316.11.001

### ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ «VES» КОМБИНИРОВАННОГО РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОГРАММЫ «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT»

Алексей Алексеевич Герасименко<sup>1</sup>, Евгений Владимирович Пузырев<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Сибирский федеральный университет, г.  
<sup>1</sup>gerasimenkoa@yandex.ru, <sup>2</sup>puzyrev\_ev@mail.ru

Представлена общая структура программного модуля «VES» программы «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT», реализующего одно из направлений комбинированного подхода расчёта потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6–35 кВ. Дано краткое описание функционального назначения и содержания программного модуля VES.

**Ключевые слова:** потери электрической энергии, программный модуль, детерминированный метод, стохастический метод, комбинированный метод.

### PROGRAM MODULE «VES» COMBINED CALCULATION OF ELECTRICAL ENERGY LOSSES OF THE PROGRAM «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT»

A.A. Gerasimenko, E.V. Puzyrev

Presents the general structure of the software module “VES” of program “POTERI V1.1: SETI, REG10PVT” that implements one of the areas of combined approach to calculating electricity losses in distribution networks of 6–35 kV. A brief description of the functional purpose and content of the software module “VES”.

**Keywords:** electric energy losses, deterministic method, stochastic method, combined method.

**Краткая характеристика программы «POTERI».** Первая версия программы «POTERI V1.1: SETI и REG10PVT» (версия 2.1 от 15 июля 2017 г.) объединяет два программных модуля «REG10PVT и SETI», реализующих соответственно детерминированный и вероятностно-статистический методы расчёта потерь ЭЭ [1, 2]. Версия 2.2 от 21 ноября 2018 г. объединяет три программных модуля *REG10PVT*, *SETI* и *VES*, реализующих соответственно детерминированный, вероятностно-статистический и комбинированный методы расчёта потерь электрической энергии (ЭЭ). Детерминированный подход использует метод средних нагрузок с моделированием среднеквадратичного тока по данным системы головного учёта [3, 4]. Вероятностно-статистический подход основан на принципах факторного моделирования электрических нагрузок [5, 6]. Комбинированный метод уравнивает достоинства и недостатки каждого из методов [7, 8].



На рис. 1 приведено основное окно интерфейса программного комплекса «POTERI» (версия 2.2).



Рис. 1. Основное окно интерфейса программы «POTERI» (версия 2.2)

Приведём расшифровку аббревиатуры в полном названии программы «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT»: POTERI – общее, а также сокращённое название программного комплекса; «V» – указание на программный модуль «VES», реализующий комбинированный подход к расчёту потерь электроэнергии на основе весового сочетания методов; 1.1: – две единицы указывают на возможность комбинирования стохастического (первая цифра) и детерминированного (вторая цифра) методов расчёта потерь электроэнергии; «SETI» – название программного модуля, реализующего стохастический метод расчёта потерь электроэнергии; «REG10PVT» – название программного модуля, реализующего детерминированный метод расчёта потерь электроэнергии. В версии 2.2 первая цифра – переход с языка программирования Fortran на язык программирования Delphi, а вторая цифра – номер модификации программы на языке программирования Delphi.

**Структура и алгоритм работы программного модуля VES.** Программная реализация комбинированного метода выполнена на основе результатов эксперимента по поиску оптимального сочетания детерминированного и стохастического методов [8]. Для вычисления средневзвешенного значения необходимо произвести расчёты потерь электрической энергии с помощью программных модулей «REG10PVT» и «SETI», сохранив в отдельной папке протоколы расчёта в формате \*.CSV. С помощью программного модуля «VES» необходимо выбрать соответствующие протоколы и одно из возможных весовых сочетаний оптимального диапазона  $\alpha = [0,7; 0,8]$  детерминированного и стохастического подходов [8].

В программном модуле «VES» реализована возможность определения нормативного значения потерь ЭЭ по усовершенствованному алгоритму расчёта и оценки нормативных значений потерь ЭЭ, который базируется на расчёте средневзвешенного значения технических потерь ЭЭ [7, 9].

На рис. 2 и 3 представлены основное окно и рабочее окно подготовки исходных данных и выполнения расчёта программного модуля «VES».



Рис. 2. Основное окно программного модуля *VES*

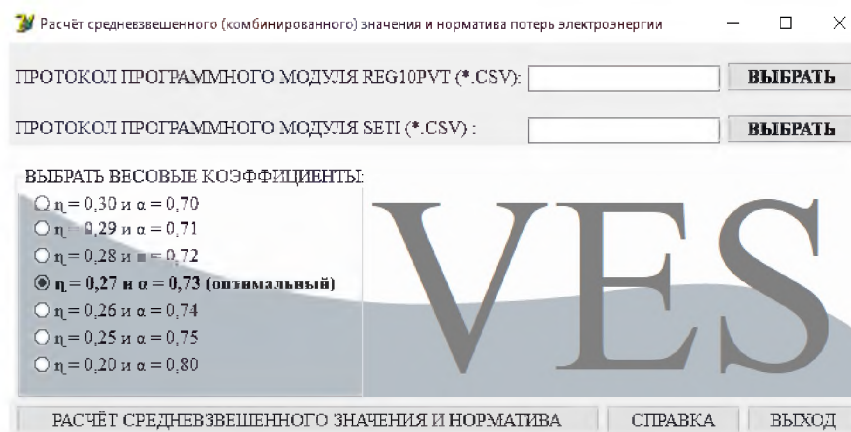


Рис. 3. Окно подготовки исходных данных в программном модуле *VES*

Укрупнённая блок-схема программного модуля *VES* приведена на рис. 4.

Рассмотрим в отдельности каждый из блоков программного модуля «VES»:

1-й блок – выбор протокола с результатами расчёта потерь ЭЭ стохастическим методом с помощью программного модуля «SETI».

2-й блок – выбор протокола с результатами расчёта потерь ЭЭ детерминированным методом с помощью программного модуля «REG10PVT».

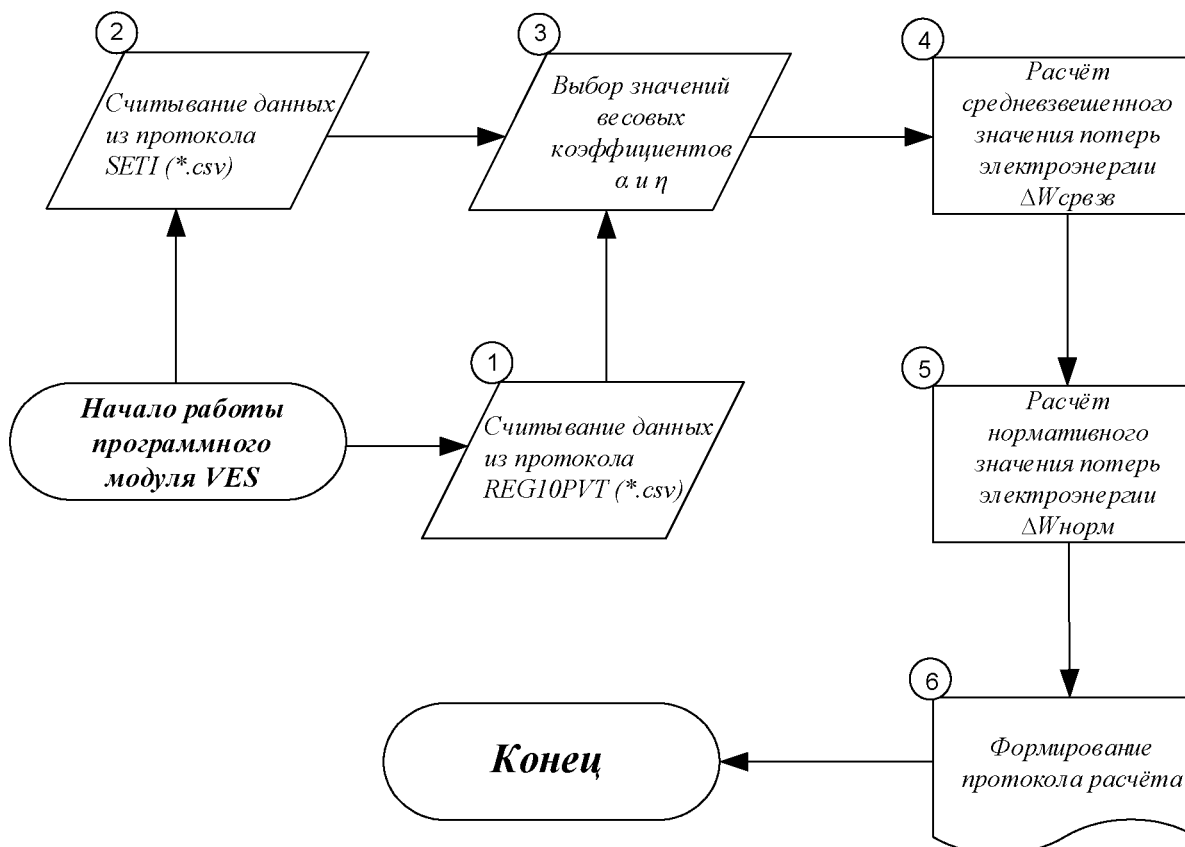


Рис. 4. Укрупнённая блок-схема программного модуля VES

3-й блок – выбор коэффициентов участия стохастического и детерминированного методов расчёта потерь ЭЭ в составе средневзвешенной величины.

4-й блок – расчёт средневзвешенной величины потерь ЭЭ.

5-й блок – расчёт нормативного значения потерь ЭЭ на базе средневзвешенной величины технических потерь ЭЭ.

6-й блок – после расчёта автоматически составляется протокол, в котором содержатся необходимые исходные данные из протоколов программных модулей «SETI» и «REG10PVT», а также расчётные параметры. В протоколе значения потерь ЭЭ выводятся в кВт·ч.

Таким образом, сформированный и программно реализованный алгоритм позволяет выполнять комбинированный расчёт потерь ЭЭ в сетях 6–35 кВ и получать расчётное значение потерь ЭЭ с высокой надёжностью (0,95) со средней погрешностью (центральное значение ошибки), приближающейся к нулевому значению (0,019 %), и разбросом, не превышающим погрешности исходных данных ( $\pm 2\%$ ). Доверие к вычисленному значению потерь ЭЭ выше, чем к искомому параметру, полученному на основе раздельного использования детерминированного или стохастического методов [7, 8].

## Список литературы

1. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Программа расчёта потерь электрической энергии детерминированным и стохастическим методами // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сб. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. Тольятти, 2017. С. 26–39.
2. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Software implementation of deterministic and stochastic calculation methods of electric energy losses in electrical distribution networks // Znanstvena misel journal. Словения. 2018. Vol. 1. № 14. С. 49–57.
3. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Общая алгоритмическая структура программы «POTERI V1.1» расчёта потерь электрической энергии // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. № 2(7). 122 с.
4. Герасименко А.А., Тимофеев Г.С. Методика, алгоритм и программа расчета технических потерь ЭЭ в распределительных сетях энергосистем // Вестник электроэнергетики. 2001. № 4. 74 с.
5. Герасименко А.А., Нешатаев В.Б., Шульгин И.В. Расчёт потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях на основе вероятностно-статистического моделирования нагрузок // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. № 1. С. 71–77.
6. Герасименко А.А., Шульгин И.В. Стохастический метод расчета нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Электрические станции. 2013. № 4. С. 44–59.
7. Герасименко А.А., Куценов Д.А. Совместное применение детерминированного и статистического алгоритмов для определения потерь электроэнергии в распределительных сетях // Энергосистема: управление, качество, конкуренция: сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2004. С. 128–132.
8. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Комбинированное объединение детерминированного и стохастического методов в алгоритме расчёта потерь электроэнергии // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 3. С. 12–16.
9. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Определение величины нормативных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Вестник КрасГАУ. 2013. № 10. С. 220–235.

## **ОБ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВНУТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ РАЗОМКНУТЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРОДОЛЬНОЙ САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ**

Артём Валерьевич Проничев<sup>1</sup>, Елена Олеговна Солдусова<sup>2</sup>,  
Евгений Михайлович Шишков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара

<sup>1</sup>teyoma@bk.ru, <sup>2</sup>esoldusova@inbox.ru, <sup>3</sup>e.m.shishkov@ieee.org

Для целей организации продольной компенсации на сверхдальних воздушных линиях электропередачи в предыдущих работах авторов предложен способ использования собственной распределённой ёмкости – построение разомкнутой линии электропередачи с расщепленной фазой, составляющие которой электрически изолированы друг от друга таким образом, что часть составляющих подключена только к шинам источника питания, а часть – только к шинам потребителя. В настоящей работе произведена оценка предела передаваемой мощности разомкнутых воздушных линий (РВЛ) при различных значениях нагрузки. Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи использовались методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScape SimPowerSystems. Была составлена математическая модель для анализа режимов нагрузки и холостого хода разомкнутой линии. Был проведен расчёт некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. С использованием данной модели проведена оценка некоторых видов замыканий. Результаты первичного анализа аварийных режимов РВЛ позволяют утверждать о возможности использования традиционных принципов организации защит линий.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, продольная компенсация, самокомпенсированная линия.

## **ABOUT ANALYSIS OF THE ELECTRICAL MODE OF THE INTRA-PHASE SHORT CIRCUIT FOR OPEN LINES WITH LONGITUDE SELF-COMPENSATION**

A.V. Pronichev, E.O. Soldusova, E.M. Shishkov

For the purpose of organizing longitudinal compensation for long-distance overhead power transmission lines, the authors proposed in previous works the method of using their own distributed capacitance – the construction of an open power line with a split phase, the components of which are electrically isolated from each other in such a way that one part of the components is connected only to the power supply buses, and other part only to the consumer's buses. In this paper, the limit of the transmission capacity of open overhead lines at different load values is estimated. To analyze the efficiency of using open overhead transmission lines, mathematical modeling methods were used in the MATLAB / Simulink with using the SimScape SimPowerSystems element library. A mathematical model is developed

for the analysis of load and off-load conditions of the open line. Calculation of some emergency operation modes of the open overhead line. Using this model, the following types of closures were evaluated. The results of the primary analysis of the emergency regimes of the open overhead line make it possible to assert the possibility of using the traditional principles of organization of line protections.

**Keywords:** overhead transmission line, longitude compensation, self-compensated line.

Установки продольной компенсации являются неотъемлемым элементом сверхдальних передач переменного тока [1]. Одним из способов достижения цели продольной компенсации – уменьшения продольной индуктивности воздушной линии (ВЛ) – является настройка линии на резонанс напряжений или резонанс токов. Эта идея была предложена в работах И.И. Соловьёва и А.А. Вульфа [2] в первой половине XX века. Позднее профессором Н.Ф. Ракушевым в работе [3] был предложен способ реализации данной идеи – разомкнутая линия электропередачи, каждая фаза которой состоит из двух изолированных друг от друга проводников, один из которых (прямая составляющая) подключен к шинам передающей подстанции, а второй (встречная составляющая) – к шинам приёмной. При достаточной длине линии взаимная емкостная проводимость, созданная между прямой и обратной составляющих, могла бы полностью скомпенсировать собственную индуктивность линии.

В работе [4] авторами предложена усовершенствованная конструкция разомкнутой ВЛ, выполненная по принципу расщепления фазы. В такой линии прямая и встречная составляющие расщеплённой фазы подвешены на одной траверсе и отделены друг от друга диэлектрическими распорками. При этом на одной опоре могут располагаться все три фазы разомкнутой ВЛ. В работе [5] авторами предложена математическая модель в фазных координатах, учитывающая принципиальную несимметрию разомкнутой ВЛ как трёхфазной системы, а в работе [6] – способ реализации этой модели в виде методик расчёта установившегося режима линии.

В работе [7] рассмотрен вопрос определения оптимальной конструкции расщепленной фазы разомкнутой воздушной линии, однако расчеты производились на однофазной модели.

Целью данного исследования является расчет и анализ режимов нагрузки предложенной в [4] конструкции трехфазной разомкнутой ВЛ.

Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи используются методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов

SimScape SimPowerSystems. Выполнен анализ режимов работы линий двух классов напряжения (500 и 750 кВ) и трех вариантов конструкций расщепленной фазы.

С учётом полученных ранее результатов анализа установившихся режимов РВЛ [8], в настоящей работе проведен расчёт некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. Для этого модель общего участка линии представлена в виде четырёх последовательно соединённых блоков многопроводной схемы замещения, каждый из которых моделирует участок равной длины (рис. 1).

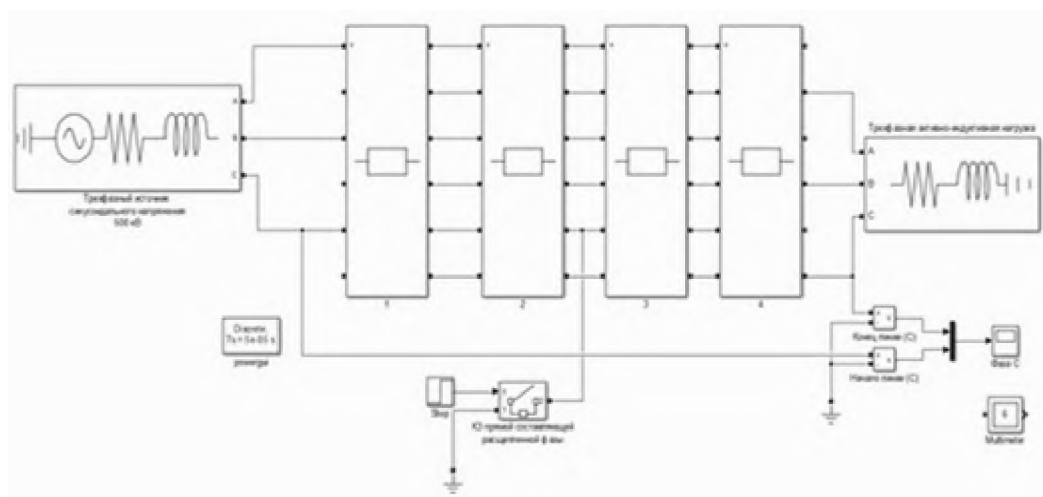


Рис. 1. Математическая модель в среде MATLAB/Simulink для расчета некоторых аварийных режимов работы трехфазной разомкнутой ВЛ

С использованием данной модели проведена оценка следующих видов замыканий:

- внутрифазное КЗ (замыкание между прямой и обратной составляющей);
- внутрифазное КЗ с участием земли;
- замыкание прямой или обратной составляющей на землю.

Режим внутрифазного КЗ – аварийный режим, характерный только для линии с продольной компенсацией. Опасность данного режима заключается в шунтировании внутрифазной ёмкости, которое может привести к нарушению устойчивости работы линий.

Однако результаты моделирования (рис. 2) кратковременно возникающего внутрифазного КЗ позволяют говорить лишь о незначительных изменениях напряжения в повреждённой фазе.

При этом ток в месте установки защиты изменяется незначительно, что вынуждает использовать дистанционные либо высокочастотные защиты для обнаружения данного вида замыканий (рис. 3).

Как и следовало ожидать, в режиме внутрифазного замыкания с участием земли наблюдается значительная несимметрия напряжений.

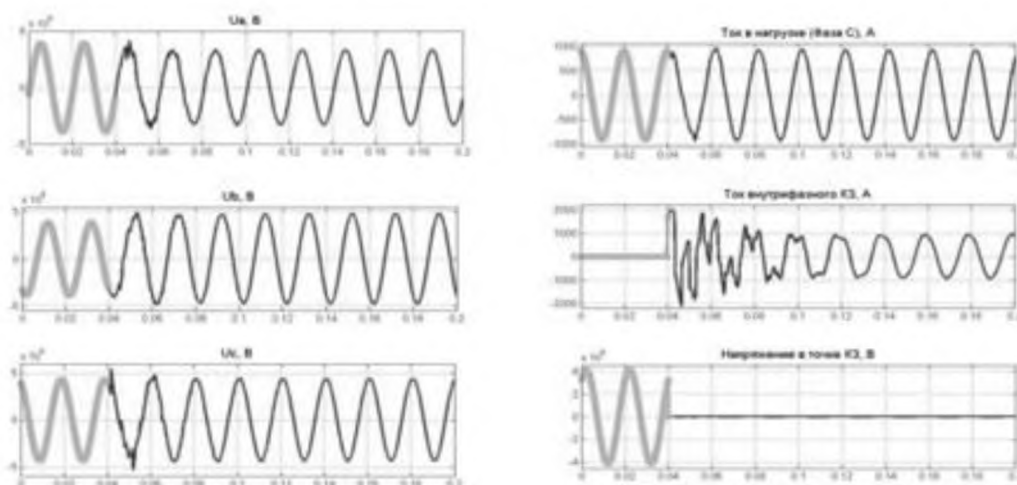


Рис. 2. Результаты моделирования, кратковременно возникающего внутрифазного КЗ



Рис. 3. Внутрифазное КЗ

В работе построена математическая модель трехфазной разомкнутой ВЛ для расчёта некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. С использованием данной модели проведена оценка следующих видов замыканий:

- внутрифазное КЗ (замыкание между прямой и обратной составляющей);
- внутрифазное КЗ с участием земли.

Результаты первичного анализа аварийных режимов РВЛ позволяют утверждать о возможности использования традиционных принципов организации защит линий. В режимах с шунтированием внутрифазной ёмкости не происходит нарушения устойчивости работы линии, однако для обнаружения внутрифазных повреждений необходимо предусматривать не токовые виды релейных защит: дистанционные, высокочастотные.



## Список литературы

1. Готман В.И., Глазачев А.В., Бацева Н.В. Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 68–75.
2. Вульф А.А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния компенсированным линиям. М.: Госэнергоиздат, 1945. 83 с.
3. Ракушев Н.Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. М.: Госэнергоиздат, 1957. 160 с.
4. Разомкнутая трехфазная воздушная линия электропередачи переменного тока: пат. 130458 Рос. Федерация № 2013103649/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.
5. Шишков Е.М., Гольдштейн В.Г., Кривихин И.Н. Математическая модель самокомпенсированной воздушной линии электропередачи // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2015. С. 620–623.
6. Shishkov E., Goldstein V., Krivihin I. Open Overhead Transmission Lines // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 792. P. 293–299.
7. Определение оптимальной конфигурации расщепленной фазы для самокомпенсированных разомкнутых линий электропередачи / А.В. Проничев [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2016. Т. 1. С. 198–201.
8. Проничев А.В., Солдусова Е.О., Шишков Е.М. Оценка предела передаваемой мощности разомкнутой воздушной линии электропередачи // Вестник Самарского государственного технического университета. 2017. № 2(54). С. 139–144. (Сер. «Технические науки»).

УДК 620.9

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТЬЮ

Вилия Равильевна Иванова<sup>1</sup>, Виталий Викторович Новокрещенов<sup>2</sup>,  
Ольга Дмитриевна Семенова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>vr-10@mail.ru, <sup>2</sup>vitnov@inbox.ru, <sup>3</sup>ollivka@bk.ru  
<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

В статье обсуждается развитие интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), приводится анализ модели функционирования ИЭС ААС, описание основных устройств и элементов.

**Ключевые слова:** интеллектуальная электроэнергетика, микропроцессоры, элементы, стандарт, активно-адаптивная сеть, агент, автоматика, система.

## ANALYSIS OF THE MAIN ELEMENTS OF THE SMART POWER SYSTEM WITH ACTIVE-ADAPTIVE NETWORK

V.R. Ivanova, V.V. Novokreshenov, O.D. Semenova

The article discusses the development of an intelligent power system with an active-adaptive network, provides an analysis of the model of operation, a description of the main devices and elements.

**Keywords:** intelligent power engineering, microprocessors, elements, standart, active-adaptive network, agent, automation, system.

В настоящее время ведется активное развитие и внедрение новой идеологии создания и эксплуатации электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. В основе модернизации лежит замена оборудования станций, подстанций, линий электропередачи, устройств систем противоаварийной автоматики и релейной защиты. Замена осуществляется на элементы, работа которых основана на принципах работы полупроводников и представляет собой микропроцессорные устройства. Для их функционирования внедряются современные информационные технологии с различными протоколами передачи данных, протоколами синхронизации времени, фильтрации информации и др. На такой базе идут попытки построения интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). ИЭС ААС представляет собой взаимодействие нескольких или множества интеллектуальных агентов для обеспечения эффективного использования природных и человеческих ресурсов, управления субъектов генерации и надежности электроснабжения потребителей [1–3].

Многоагентность системы позволит решить проблемы, которые невозможно было решить с помощью моноагентной системы. В классическом понимании система, которая имеет в своем распоряжении всю необходимую информацию, знания, информационные технологии, способности обучения, может реализовать решение единой глобальной проблемы. В такой системе весь перечень задач по соответствующим протоколам распределяется между агентами, они, в свою очередь, выполняют роль исполнителя в системе.

Информация о протоколах реализации связи для электроэнергетических систем приведена в стандарте Международной электротехнической комиссии (МЭК 61850). Данный документ направлен на реализацию функциональной совместимости устройств различных фирм производителей. Однако данный стандарт проработан наполовину, он имеет неутвержденные разделы, а именно: данные разделы представлены в виде технических

требований, которые отражают все положения детально и полно, но не прошли еще все стадии утверждения, либо в виде технического отчета, т. е. носят чисто информативный характер и отражают результаты проведенных исследований. Несмотря на актуальность введения стандарта МЭК 61850, существуют противоречия в области внедрения результатов утверждения. К недостаткам следует отнести сложность стандарта, что влечет за собой создание учебной базы для обучения персонала, обслуживающего новое оборудование, и специалистов в области проектирования цифровых подстанций. Так, в одном из разделов МЭК 61850 приводится язык конфигурации подстанции (*SCL*), с помощью которого описываются однолинейные схемы подстанции, вычислительные сети энергетических объектов, логические узлы, информация об интеллектуальных устройствах. Для чтения и расшифровки данных сведений необходимо специальное образование.

Еще одним значимым торможением развития ИЭС ААС является повышенная стоимость микропроцессорного оборудования.

Интеллектуальная электроэнергетическая система строится (согласно МЭК 61850) на базе сетевой модели *OSI* (*open systems interconnection basic reference model*). Описание уровней модели начинается с седьмого и заканчивается первым. Седьмой уровень носит название прикладной, он обеспечивает взаимодействие пользователей с сетью. Примерами протоколов прикладного уровня выступают *RDP*, *HTTP*, *TELNET* и др. К шестому уровню относится уровень представления (протокол *LPP* – *Lightweight Presentation Protocol*), к пятому – сеансовый (*PPTP* – *Point-to-Point Tunneling Protocol*), к четвертому – транспортный (*TCP* – *Transmission Control Protocol*), к третьему – сетевой (*IP/IPv4/IPv6* – *Internet Protocol*), ко второму – канальный (*IEEE 802.3* (*Ethernet*)), к первому – физический (*IEEE 802.15* (*Bluetooth*)).

Данная модель позволяет различным сетевым устройствам взаимодействовать друг с другом. Такое взаимодействие может быть как вертикальным, так и горизонтальным. Последнее зависит от возможности «сотрудничества» протокола с протоколами своего уровня или выше/ниже своего уровня. Главной отличительной чертой модели *OSI* является то, что ее протоколы могут выполнять функции только своего уровня, в альтернативных моделях данное условие не выполняется.

Для реализации ААС необходимо внедрение высокоскоростных средств связи, применение гибких линий электропередачи, быстродействующих средств диагностики в режиме реального времени, преобразователей с микропроцессорным управлением. Ожидаемой эффективностью

исполнения такого рода ААС станет увеличение пропускной способности линии, снижение суммарных потерь электроэнергии, повышение надежности электроснабжения потребителей.

Технические средства ААС обеспечивают ее управляемость и определяют «интеллектуализацию» электроэнергетики. К ним относятся:

- устройства регулирования параметров сети;
- регулируемые устройства компенсации реактивной мощности;
- устройства продольно-поперечного включения;
- устройства ограничения токов короткого замыкания;
- кабельные линии электропередачи на базе сверхпроводников;
- накопители электрической энергии;
- преобразователи рода тока (постоянный в переменный и наоборот).

Первые четыре группы относятся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока (*FACTS – Flexible Alternative Current Transmission System*). *FACTS* предполагает преобразование пассивного устройства транспортировки электроэнергии в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических линий [4].

В настоящее время наиболее продвинутым способом применения сверхпроводимости в электроэнергетике является их использование в силовых сверхпроводящих кабелях [5]. Преимуществами такого внедрения выступают:

- масса кабелей (за счет меньшего количества материала);
- увеличенный цикл работы;
- экологическая безопасность, пожаробезопасность;
- возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении.

Накопители электроэнергии является важным элементом ИЭС ААС. Главной их задачей является обеспечение бесперебойного питания потребителей первой и второй категории [6]. Помимо этого существует еще ряд функций, которые заведомо должны обеспечивать накопители: выравнивание графиков нагрузки в сети; повышение устойчивости. Существует несколько типов накопителей энергии, к ним относятся: накопители энергии на основе молекулярных конденсаторов; аккумуляторные батареи большой энергоемкости; накопители на основе низкотемпературных сверхпроводников. Практическое применение все типы накопителей нашли в зарубежных странах, темпы роста их производства набирают обороты.

Многоуровневой системе управления в электроэнергетике Российской Федерации предстоит переход на новую ступень управления с максимально задействованной автоматизацией всех уровней и повышенной надежностью. Такая программа перехода и эволюционного развития станет основополагающей в сфере энергетики в целом.

### **Список литературы**

1. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4.
2. Кобец Б.Б., Волкова И.О., Огороков В.Р. Smart Grid как концепция инновационного развития // Энергоэксперт. 2010. № 2.
3. Иванова В.Р., Иванов И.Ю. Разработка критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации активно-адаптивных электроэнергетических систем // Высокие технологии и инновации в науке: матер. Междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2018. С. 112–116.
4. Сираев Л.И., Роженцова Н.В. Моделирование гибридной системы электроснабжения промышленного предприятия // Фёдоровские чтения – 2017: матер. XLVII Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы. Казань, 2017. С. 338–340.
5. Фетисов Л.В., Низамутдинов Р.Р., Шайхиев И.Г. Энергосбережение в электроприводе аэрационных установок очистных сооружений биологической очистки сточных вод // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 5. С. 158–160.
6. Панов Д.Ю., Денисова А.Р. Энергоэффективные мероприятия в административных учреждениях // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): матер. V Всерос. науч.-техн. конф. к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» института энергетики и электротехники Тольяттинского государственного университета. Тольятти, 2017. С. 268–272.

УДК 621.315.1

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 10 КВ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ**

Мария Валерьевна Крылова

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань  
mariekrulovva@mail.ru

Целью данной работы является исследование режима районной электрической сети 10 кВ с целью определения повреждений. Моделирование производится в программе Matlab Simulink. В данной статье рассматривается режим с симметричной

нагрузкой и несимметричной, с коэффициентом несимметрии 4 %. Также в ней представлены результаты моделирования со схемами соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда» и «треугольник-звезда».

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть 10 кВ; обрыв провода; замыкание на землю; определение места обрыва.

## RESEARCH OF MODES DISTRIBUTION ELECTRICAL GRIDS 10 KV WITH THE PURPOSE OF DAMAGE PLACES DEFINITION

M.V. Krulova

The aim of this work is research of regional electrical grid 10 kv to determine the breaks. The simulation is performed in Matlab Simulink. In this paper we consider symmetric mode and asymmetric load, with the asymmetry coefficient of 4 %. Also presents the simulation results with coupling circuits of the transformer windings “star-star” and “triangle-star”.

**Keywords:** distribution electrical grid 10 kv, breakage of a wire, earth fault, determination of breakage place.

В данной статье показаны способы определения места повреждения при двухфазных замыканиях на землю и обрыве фаз.

Анализ аварийного участка выполняется по значению тока и напряжения на подстанциях. Для этого смоделирована трехфазная схема замещения сети 10 кВ, при использовании которой устанавливается соотношение аварийных токов и напряжений к расстоянию до мест повреждений (рис. 1).

В случае обрыва ближайшее вероятное место повреждения определяется минимальным значением тока поврежденной фазы.

После обрыва можно увидеть, что ток в поврежденной фазе становится равнозначным нулю (рис. 2), в то время как на других участках сети выполняется перераспределение тока и напряжения. При этом на участке, который находится за пределами обрыва, напряжение и ток остаются постоянными.

В случае двухфазного замыкания ближайшее вероятное место повреждения определяется максимальным значением тока (рис. 3).

При замыкании фаз А и В на землю возникает существенный рост тока в поврежденных фазах. Мы видим, что на подстанциях напряжение в фазе А стало равно нулю. В неповрежденном участке А–I можно заметить падение тока и напряжения по всем трем фазам.

Следовательно, можно распознать, что повреждение произошло на участке А–2.

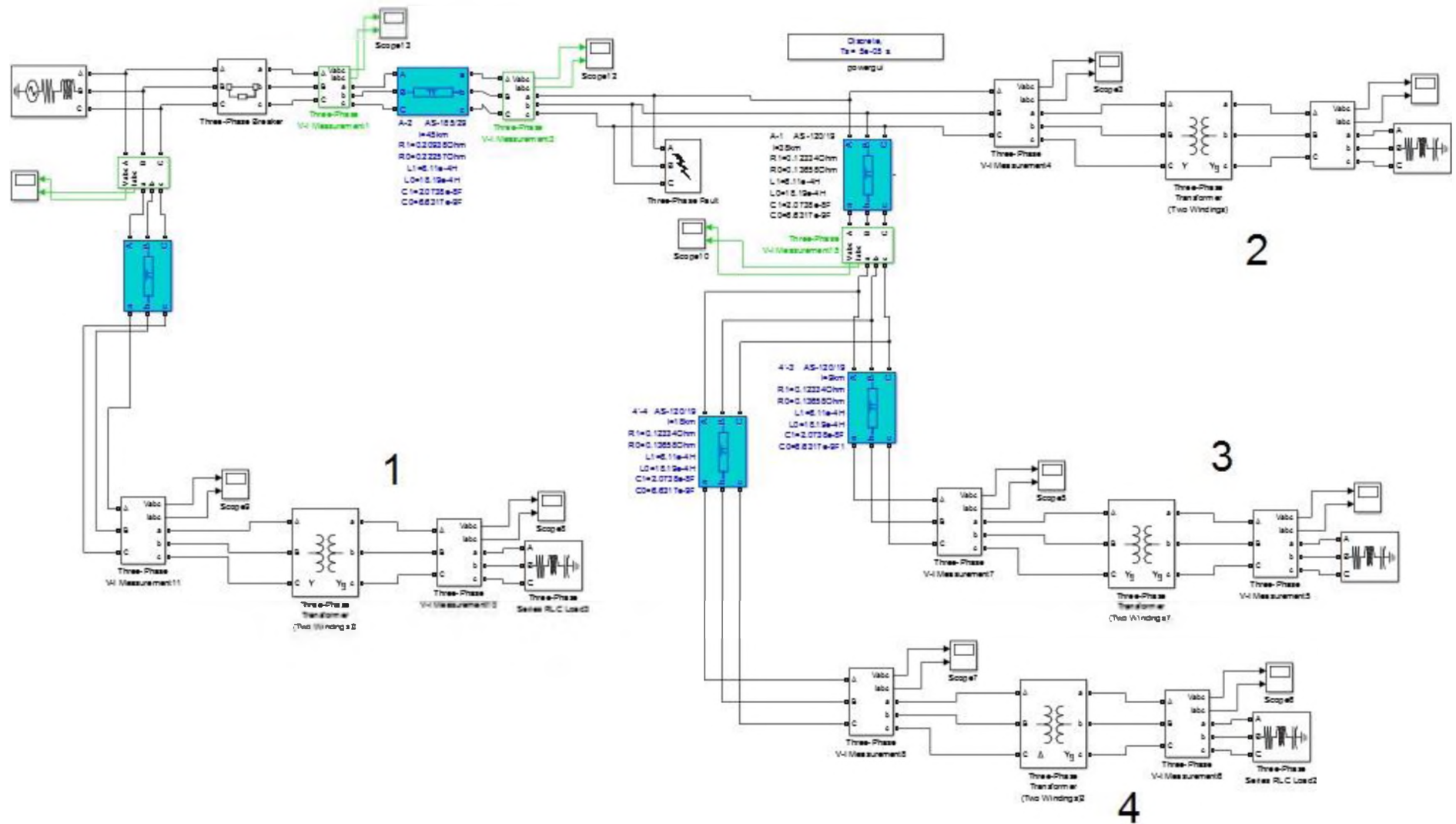


Рис. 1. Блок-схема разработанной модели участка распределительной сети с симметричной нагрузкой

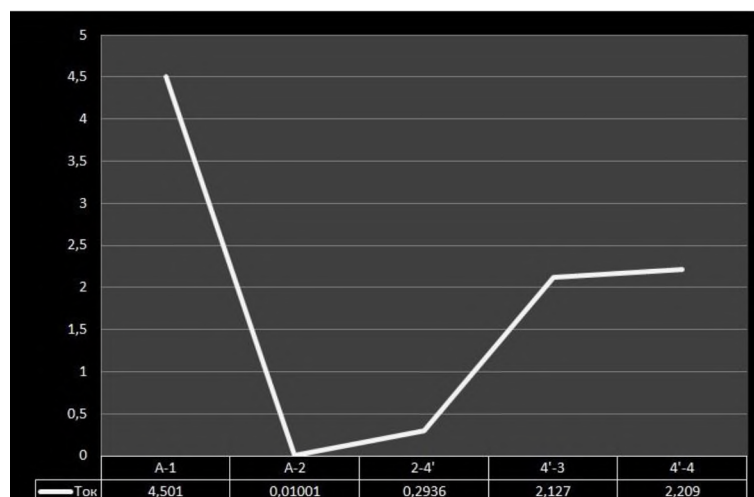


Рис. 2. Диаграмма значения тока при обрыве

Определение поврежденного участка происходит в три этапа:

1. Измерение значений фазных токов и напряжений ЛЭП, отходящих от шин распределительного устройства напряжением 6–35 кВ.
2. Измерение значений фазных токов и напряжений на каждой подстанции.
3. Определение поврежденного участка по минимальному и максимальному значениям напряжения и тока.

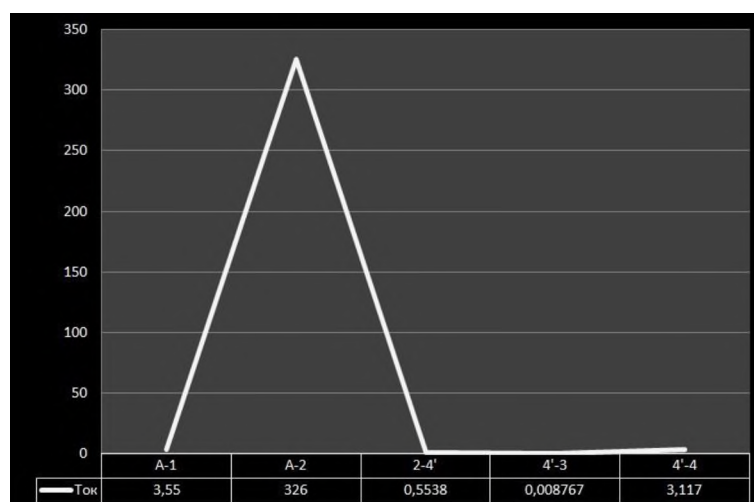


Рис. 3. Диаграмма значения тока при двухфазном замыкании

При моделировании режима несимметрии было обнаружено, что он не оказывает заметного влияния на возможность оценки поврежденного участка.

Для реализации алгоритма определения поврежденного участка необходима установка интеллектуальной системы, которая объединяется в существующую систему автоматизированного технического учета электроэнергии.



## Список литературы

1. Кузьмин И.Л. Способы определения участка повреждения в распределительных сетях 6–35 кВ на основе автономных датчиков тока: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2011. 180 с.
2. Латипов А.Г. Комплекс методик определения места повреждения в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по параметрам установившихся и переходных режимов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 212 с.
3. Хакимзянов Э.Ф., Мустафин Р.Г., Федотов А.И. Способы определения расстояний до мест повреждений при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях среднего напряжения // Релейная защита и автоматизация энергосистем: новые решения и технологии: матер. докл. науч.-практ. конф. Казань, 2014.

УДК 621.316

## ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ 220–500 кВ

Дамир Фатыхович Губаев<sup>1</sup>, Ольга Германовна Губаева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>d-gubaev@mail.ru, <sup>2</sup>mr-gubaev@mail.ru

Феррорезонансные процессы (ФРП) возникают в электрических сетях с различным номинальным напряжением и режимом работы нейтрали сети. В схемах РУ напряжением 220–500 кВ при отключении выключателями (с емкостными делителями напряжения) присоединений от секций сборных шин с подключенными электромагнитными трансформаторами напряжения (ТН), в результате феррорезонансных явлений повреждаются ТН. Сложность (в отдельных случаях, невозможность) проведения экспериментов по выявлению ФРП подтверждает, что наиболее эффективным способом определения и анализа феррорезонансных схем является математическое моделирование этих процессов. Условия возникновения феррорезонанса и возникающие при этом процессы можно оценить на основании нормативных документов [1, 2]. Положения указанных стандартов предназначены для применения проектными и эксплуатационными организациями.

**Ключевые слова:** феррорезонанс, трансформатор напряжения, воздушные выключатели, элегазовые выключатели, емкостные делители, распределительные устройства, заземление нейтрали, математическая модель, программа ЭВМ.

## FERRORESONANCE PHENOMENA IN SWITCHGEAR 220–500 kV

D.F. Gubaev, O.G. Gubaeva

Ferroresonance processes (FRP) occur in electrical networks with different nominal voltage and operating mode of the neutral network. In schemes of RP 220–500 kV at shut-down by switches, with capacitive dividers of tension, connections from sections of bus bars with the connected electromagnetic transformers of tension (TN), as a result of the ferroresonant phenomena TN are damaged. The complexity (in some cases, impossibility) of conducting experiments to identify FRP confirms that the most effective way to determine and analyze ferroresonance schemes is mathematical modeling of these processes. Conditions of occurrence of ferroresonance and arising processes can be estimated on the basis of normative documents [1, 2]. The provisions of these standards are intended for use by design and operating organizations.

**Keywords:** ferroresonance, voltage transformer, air circuit breakers, gas-insulated circuit breakers, capacitive dividers, switchgear, neutral ground, mathematical model, computer program.

Феррорезонансные явления возможны при отключении присоединений от сборных шин открытого РУ 220–500 кВ с электромагнитными ТН выключателями с емкостными делителями. Однолинейная схема замещения феррорезонансного контура приведена на рис. 1. Для выявления возникновения ФРП определяются суммарные емкости всех элементов схемы рис.1, а также вольт-амперная характеристика намагничивания трансформатора напряжения, которая приведена в Приложении А стандарта [2].

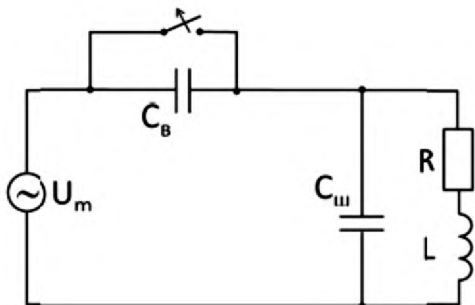


Рис. 1. Однолинейная схема замещения при отключении ненагруженной системы шин с электромагнитным трансформатором напряжения:  $U_m$  – амплитуда напряжения шин, кВ;  $C_b$  – суммарная емкость между разомкнутыми контактами всех выключателей, нФ;  $C_{ш}$  – суммарная емкость на землю всех элементов отключенной части РУ, нФ;  $L$  – нелинейная индуктивность ТН, Гн;  $R$  – активное сопротивление первичной обмотки ТН, Ом

КРУЭ 110–500 кВ исполняются с электромагнитными ТН. Выключатели КРУЭ 110-220 кВ имеют один разрыв и поэтому феррорезонанс в КРУЭ невозможен. Выключатели КРУЭ 330–500 кВ могут иметь два разрыва с шунтирующими емкостями на разрыв [1], в этом случае необходимо проводить расчет на выявление феррорезонанса для ремонтных и аварийных схем РУ.

Для определения возможности возникновения феррорезонанса по рассчитанным параметрам в РУ для схемы на рис. 1 можно воспользоваться рис. 2 [2].

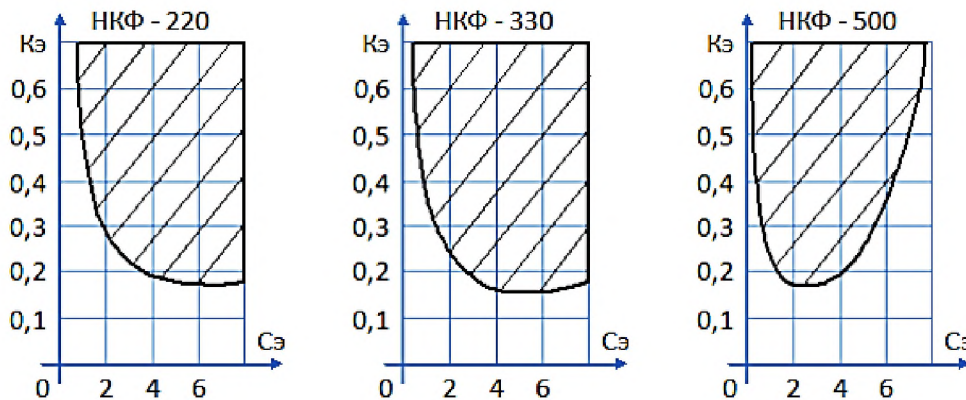


Рис. 2. Области существования феррорезонансных перенапряжений:

▨ – резонанс есть; □ – резонанса нет

$$K_{\text{э}} = \frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{ш}}}; \quad C_{\text{э}} = C_{\text{в}} + C_{\text{ш}},$$

где  $C_{\text{в}}$  – сумма результирующих значений емкостей конденсаторов, шунтирующих контакты воздушных выключателей ОРУ;  $C_{\text{ш}}$  – сумма значений емкостей, электрооборудования, ошиновки и шин ОРУ по отношению к земле.

Авторами статьи на основании исследований в области феррорезонансных явлений, приведенных в работах [3, 4], предложен алгоритм математической модели по выявлению феррорезонансных процессов в РУ 220–500 кВ с выключателями, имеющими емкостные делители, с обоснованием критериев возникновения ФРП. По алгоритму была написана программа, на которую получено авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [5].

Данная программа позволяет рассчитать ток в обмотке ВН и перенапряжения у ТН типа НКФ, а также среднеквадратичное значение тока в первичной обмотке за рассматриваемый промежуток времени (рис. 3). Критерием оценки возможного повреждения ТН можно считать превышение усредненного тока в обмотке ВН над величиной длительно допустимого тока. Превышение тока в первичной обмотке ТН серии НКФ более 0,25 А приведет к повреждению изоляции обмотки ВН для провода диаметром 0,25 мм при плотности тока 5 А/мм<sup>2</sup>. Если учесть, что при промышленном изготовлении ТН толщина изоляции и диаметр провода будут меняться в допустимых пределах  $\pm 10\%$ , то величина длительно допустимого тока

в первичной обмотке ТН снижается до 0,22 А. При переходных ФРП в схемах величина тока изменяется в широких пределах, поэтому необходимо проводить расчет его усредненного параметра. На рис. 3 приведен пример расчета для феррорезонансной схемы в РУ 220 кВ.

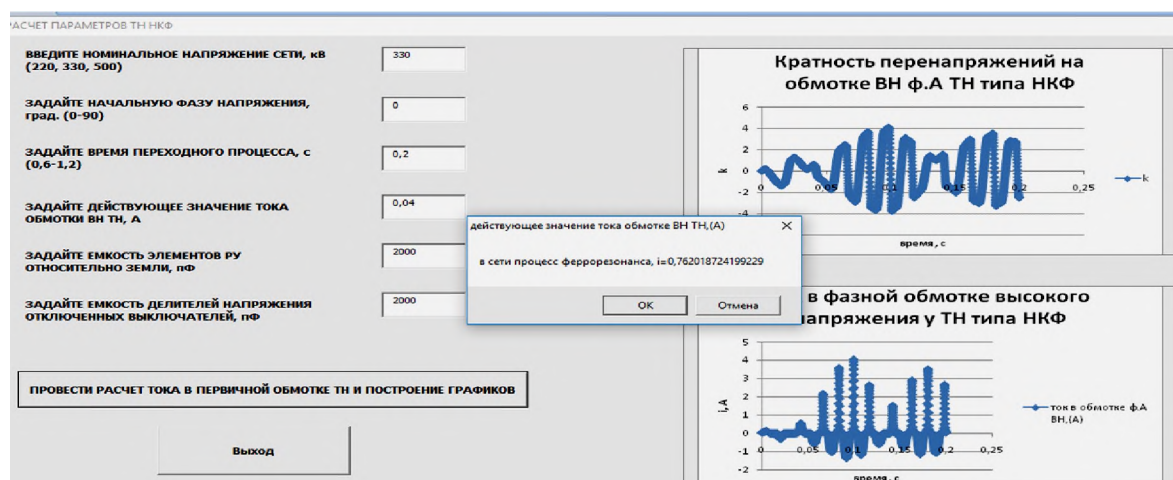


Рис. 3. Форма программы по расчету перенапряжений и тока в обмотке ВН ТН типа НКФ

Так как в целях предварительного выявления зоны возникновения феррорезонансных процессов применялись диаграммы, приведенные на рис. 2, была составлена программа, позволяющая также выявлять зоны возникновения феррорезонанса в РУ 220, 330, 500 кВ в удобных для понимания пользователя абсолютных параметрах  $C_B$  и  $C_{III}$ . В качестве примера приведена зона возникновения феррорезонанса (окрашенная зона) и безопасная зона для РУ 220 кВ при изменении параметров  $C_B$  и  $C_{III}$  в приведенных диапазонах (таблица). По результатам таблицы построена трехмерная диаграмма областей феррорезонанса (рис. 4).

Таблица

Параметры действующих значений токов в первичной обмотке ТН типа НКФ-220 при различных соотношениях  $C_B$  и  $C_{III}$

| $C_{III}$ ,<br>пФ | $C_B$ , пФ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |
|-------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|                   | 200        | 450  | 700  | 950  | 1200 | 1450 | 1700 | 1950 | 2200 | 2450 | 2700 | 2950 | 3200  | 3450 | 3700 | 3950 |
| 200               | 0,08       | 0,12 | 0,19 | 0,18 | 0,29 | 0,36 | 0,40 | 0,45 | 0,51 | 0,57 | 0,62 | 0,66 | 0,72  | 0,78 | 0,82 | 0,87 |
| 450               | 0,08       | 0,17 | 0,22 | 0,28 | 0,34 | 0,38 | 0,43 | 0,48 | 0,54 | 0,60 | 0,65 | 0,69 | 0,76  | 0,80 | 0,86 | 0,91 |
| 700               | 0,02       | 0,20 | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,42 | 0,47 | 0,52 | 0,57 | 0,63 | 0,67 | 0,67 | 0,644 | 0,81 | 0,78 | 0,72 |
| 950               | 0,03       | 0,18 | 0,26 | 0,32 | 0,39 | 0,44 | 0,46 | 0,51 | 0,58 | 0,65 | 0,69 | 0,75 | 0,81  | 0,76 | 0,88 | 0,77 |
| 1200              | 0,05       | 0,07 | 0,07 | 0,18 | 0,10 | 0,43 | 0,41 | 0,54 | 0,59 | 0,62 | 0,68 | 0,78 | 0,80  | 0,87 | 0,93 | 0,96 |
| 1450              | 0,03       | 0,04 | 0,10 | 0,11 | 0,28 | 0,50 | 0,13 | 0,43 | 0,64 | 0,68 | 0,62 | 0,67 | 0,79  | 0,70 | 0,97 | 0,90 |
| 1700              | 0,04       | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,16 | 0,55 | 0,61 | 0,66 | 0,71 | 0,77 | 0,82 | 0,88 | 0,93  | 0,99 | 1,05 | 1,11 |

| $C_{ш}$ ,<br>пФ | $C_{в}$ , пФ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                 | 200          | 450  | 700  | 950  | 1200 | 1450 | 1700 | 1950 | 2200 | 2450 | 2700 | 2950 | 3200 | 3450 | 3700 | 3950  |
| 1950            | 0,044        | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,14 | 0,16 | 0,59 | 0,66 | 0,57 | 0,81 | 0,86 | 0,92 | 0,98 | 1,03 | 1,09 | 1,15  |
| 2200            | 0,04         | 0,05 | 0,05 | 0,09 | 0,06 | 0,20 | 0,09 | 0,49 | 0,16 | 0,82 | 0,46 | 0,15 | 0,81 | 0,94 | 0,11 | 1,01  |
| 2450            | 0,05         | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,12 | 0,16 | 0,25 | 0,20 | 0,63 | 0,31 | 0,23 | 0,31 | 1,19  |
| 2700            | 0,04         | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,15 | 0,18 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,17 | 0,19 | 0,18 | 0,81 | 0,28 | 0,21  |
| 2950            | 0,06         | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,14 | 0,13 | 0,08 | 0,12 | 0,07 | 0,14 | 0,11 | 0,12 | 0,37 | 0,46 | 0,24  |
| 3200            | 0,05         | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,15 | 0,17 | 0,11 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,13 | 0,35 | 0,36 | 0,16  |
| 3450            | 0,07         | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,11 | 0,10 | 0,14 | 0,11 | 0,17 | 0,22 | 0,15 | 0,21 | 0,24 | 0,19 | 0,30  |
| 3700            | 0,07         | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,14 | 0,18 | 0,10 | 0,21 | 0,13 | 0,17 | 0,18 | 0,20 | 0,324 |
| 3950            | 0,08         | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,11 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,12 | 0,17 | 0,10 | 0,15 | 0,25 | 0,19 | 0,17  |

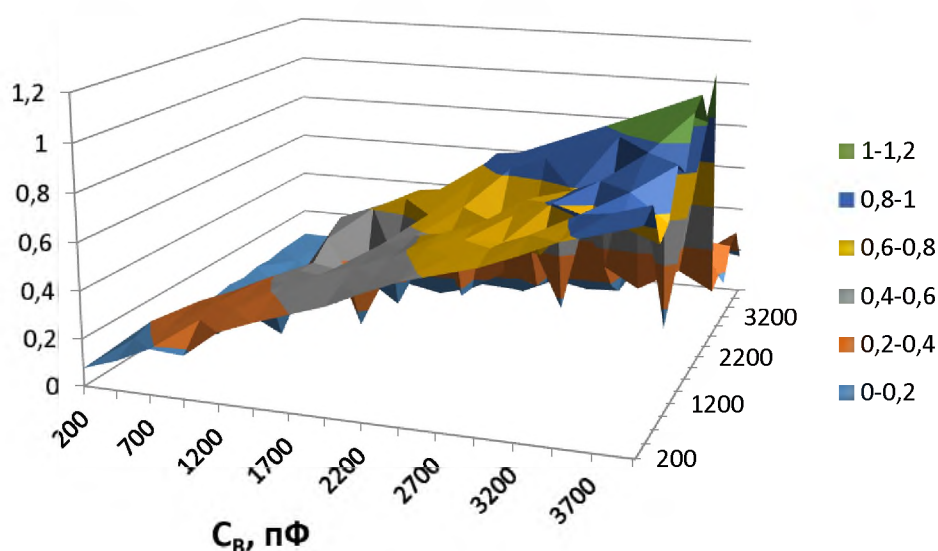


Рис. 4. Действующие значения токов в первичных обмотках ТН типа НКФ при различных значениях  $C_{ш}$  и  $C_{в}$  в РУ 220 кВ

Апробация программы ЭВМ проводилась на реальных приведенных примерах повреждения ТН в РУ 220–500 кВ.

1. Выявление ФРП в РУ напряжением 220–500 кВ с электромагнитными ТН невозможно без проведения предварительных расчетов на ЭВМ.

2. Представленная компьютерная программа производит расчеты конкретных схем РУ с целью выявления ФРП для нормальных, ремонтных и аварийно-ремонтных схем РУ с учетом алгоритма работы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики.

3. Для предотвращения ФРП в схеме РУ необходимо увеличить емкость системы шин, например, подключив конденсаторы связи. Данная мера по выходу из зоны феррорезонанса также требует проведения расчета на компьютерной программе.

4. Следующим мероприятием по предотвращению ФРП в РУ 220–500 кВ является применение антирезонансных трансформаторов напряжения серии НАМИ.

Авторами статьи разработана программа по выявлению ФРП в РУ с ТН типа НАМИ.

### Список литературы

1. СТО 56947007-29.240.10.191-2014. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2014.

2. СТО 56947007-29.240.01.221-2016 Руководство по защите электрических сетей напряжением 110–750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2016.

3. Антонов Н.А. Анализ феррорезонансных схем электрических сетей 110–500 кВ методами математического регулирования: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 1998.

4. Лаптев О.И. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в электрических сетях высокого и среднего напряжения: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007.

5. Расчет тока в первичной обмотке трансформатора напряжения типа НКФ (220, 330, 500) с целью выявления феррорезонанса в РУ (220, 330, 500) кВ: а. с. 2018661538 Рос. Федерация № 2018618696; заявл. 14.08.18; опубл. 07.09.18.

УДК 621.316.1

### КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Ольга Владимировна Мазнева<sup>1</sup>, Рустэм Газизович Хузяшев<sup>2</sup>,  
Игорь Леонидович Кузьмин<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>mazneva-olga@yandex.ru, <sup>2</sup>142892@mail.ru, <sup>3</sup>to\_kigor@list.ru

В данной работе предлагается алгоритм обработки сигналов переходного процесса с использованием корреляционного анализа. Были проанализированы реальные сигналы переходного процесса, полученные при помощи программно-аппаратного комплекса волнового места определения повреждений (ПАК ВОМП). В качестве первоначального анализа были рассмотрены случаи с упрощенными сигналами.

**Ключевые слова:** цифровой фильтр, корреляционный анализ, сигнал, переходный процесс, алгоритм, математический анализ.

# CLASSIFICATION OF TRANSIENT SIGNALS USING CORRELATION ANALYSIS

O.V. Mazneva, R.G. Khuzyashev, I.L. Kuzmin

This paper proposes an algorithm for processing transient signals using correlation analysis. The real signals of the transient process received by means of the software and hardware complex of the wave site of damage detection were analyzed. Cases with simplified signals were considered as an initial analysis, mathematical analysis.

**Keywords:** digital filter, correlation analysis, signal, transition process, algorithm, mathematical analysis.

Корреляционный анализ (КА) это простейший случай искусственных нейронных сетей. В данной статье будет использован КА в задаче классификации сигналов переходного процесса (ПП).

Визуальный анализ осциллограмм переходного процесса показал, что при коммутации высоковольтного выключателя сигнал, полученный с помощью ПАК ВОМП, разбивается на два импульса со средними значениями, приведенными в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Средняя длительность сигналов по фазам

|                                                 | $\Phi_A$ | $\Phi_B$ | $\Phi_C$ | По трем фазам |
|-------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------------|
| Первый импульс, мкс                             | 308      | 194      | 275      | 259           |
| Длительность между началами двух импульсов, мкс | 942      | 830      | 1089     | 953           |
| Второй импульс, мкс                             | 380      | 247      | 436      | 354           |

Таблица 2

Разброс длительности импульсов

|                                                 | $\Phi_A$ | $\Phi_B$ | $\Phi_C$ |
|-------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Первый импульс, мкс                             | 98–563   | 31–359   | 81–594   |
| Длительность между началами двух импульсов, мкс | 822–1376 | 295–1178 | 821–1376 |
| Второй импульс, мкс                             | 240–373  | 121–381  | 12–653   |

Визуальный анализ сигналов реальных мест коротких замыканий показал, что осциллограммы имеют вид одного импульса со средней длительностью 956 мкс, с разбросом длительности 621–1180 мкс.

На основании данных, представленных выше, в цифровой фильтр будет встроена эталонная функция в виде двух импульсного сигнала. В качестве эталона для двухимпульсного сигнала будут использованы средние значения по трем фазам.



У входного сигнала, проходящего через цифровой фильтр, будет вычисляться коэффициент корреляции (КК). По максимальным значениям КК можно будет сделать вывод о природе сигнала переходного процесса (короткие замыкания или коммутации выключателя).

Зарегистрированные осциллограммы сигналов переходного процесса с помощью процедуры детектирования замещаются видеоимпульсами.

Для определения порогового значения КК будет использоваться упрощенный цифровой фильтр, состоящий из семи коэффициентов «0» и «1»: 1100111. Через такой цифровой фильтр пропускается: эталонный сигнал 1100111 и отличные от эталонного сигналы 1100000 и 1110000.

Для удобства был введен параметр, называемый смещением  $m$ . Смещение  $m$  – это сдвиг начала анализируемой осциллограммы относительно начала эталонной функции. Параметр  $m$  моделирует прохождение сигнала через цифровой фильтр.

Также для эталонной функции с коэффициентами 1100111 будут вычислены КК для эталонных функций, в начало и конец которых будет добавлено определенное количество нулей.

Как видно из рис. 1, для автокорреляционной функции максимальные значения КК достигают «1». Для более полного анализа дополнительно рассматриваем значения левого «лепестка».

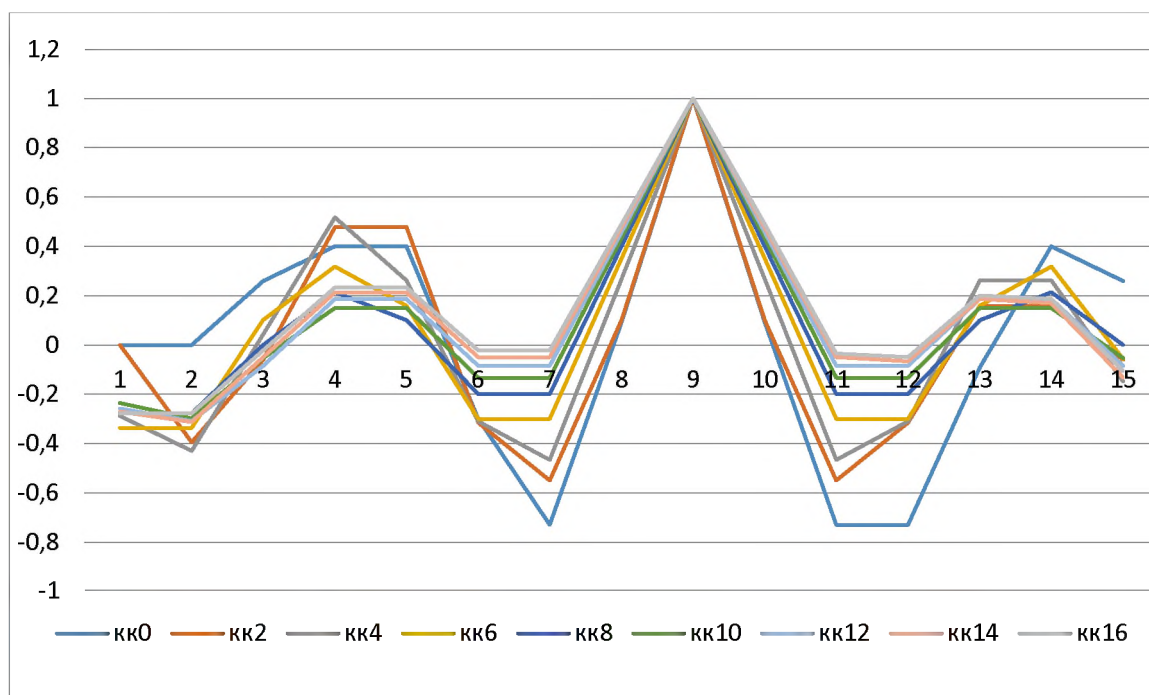


Рис. 1. График зависимости КК от смещения  $m$  для эталонного сигнала (кк0, кк2, ..., кк16 – коэффициент корреляции для эталонной функции, где 0, 2, ..., 16 количество добавленных нулей)



Таблица 3

Максимальное значение величины левого «лепестка»

| Количество добавленных «0»        | 0   | 2     | 4    | 6    | 8   | 10    | 12   | 14    | 16    |
|-----------------------------------|-----|-------|------|------|-----|-------|------|-------|-------|
| Анализируемая функция:<br>1100111 | 0,4 | 0,478 | 0,52 | 0,35 | 0,4 | 0,433 | 0,46 | 0,475 | 0,489 |

При добавлении четырех нулей величина левого «лепестка» достигает максимального значения.

На рис. 2 отображен КК для сигналов с количеством «0» и «1»: 1100000 и 1110000, соответственно. Как видно из рис. 2, для сигнала 1100000 КК достигает минимального значения «-1» при отсутствии добавленных нулей, т. е. сигнал полностью не совпадает с эталоном.

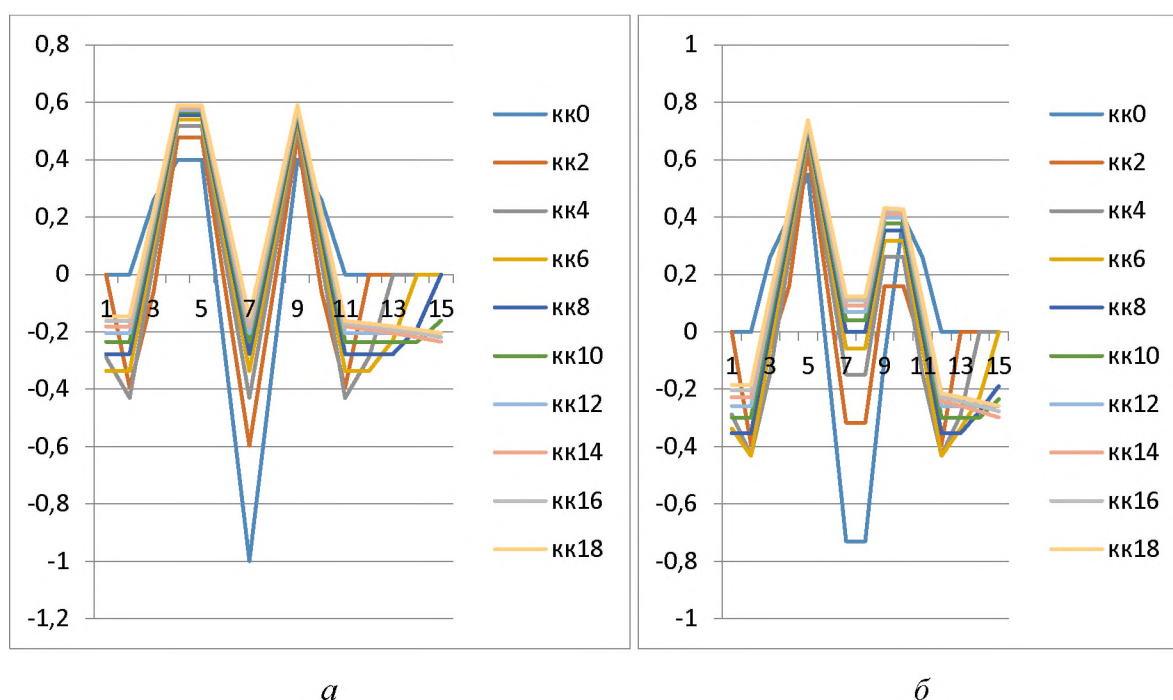
Рис. 2. График зависимости КК от смещения  $m$  для сигналов 1100000 (а) и 1110000 (б)

Таблица 4

Максимальное значение величины КК

| Количество добавленных «0»        | 0    | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12    | 14   | 16    |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| Анализируемая функция:<br>1100000 | 0,4  | 0,47 | 0,51 | 0,53 | 0,55 | 0,56 | 0,57  | 0,58 | 0,585 |
| 1110000                           | 0,55 | 0,63 | 0,67 | 0,69 | 0,7  | 0,72 | 0,724 | 0,73 | 0,734 |

Из табл. 4 можно сделать вывод, что значение КК увеличивается с добавлением нулей к эталонной функции. В связи с этим значение порога с «запасом» будет равно 0,6, а за эталонную функцию принимаем сигнал вида: 1100111 без добавления «0».

## Выводы

Предложен реальный алгоритм на основе корреляционного анализа для распознавания осциллограмм сигналов ПП, порожденных нормальными и аварийными коммутациями.

Следующим шагом исследования будет исследование погрешности предложенного алгоритма на реальных осциллограммах переходного процесса, пропущенных через цифровой фильтр со встроенной эталонной функцией.

## Список литературы

1. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И. Программно-аппаратный комплекс волнового метода определения места повреждения в сетях 6–10 кВ // РЗА-2017: матер. Междунар. конф. и выставки. СПб., 2017. С. 1179–1185.

УДК 658.264

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Владимир Александрович Тарасов<sup>1</sup>, Валентина Владимировна Тарасова<sup>2</sup>,  
Алексей Германович Калинин<sup>3</sup>, Владимир Васильевич Афанасьев<sup>4</sup>,  
Владимир Геннадьевич Ковалев<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup> ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», <sup>2</sup>Инженерно-технический центр ГОРИСС  
г. Чебоксары

<sup>1</sup>Vladimir\_tarasov@inbox.ru, <sup>2</sup>charming\_cerl@rambler.ru, <sup>3</sup>humanoid1984@yandex.ru,  
<sup>4</sup>teu\_kafedra@mail.ru, <sup>5</sup>esp21@mail.ru

Реализованный на программируемом логическом контроллере алгоритм адаптивного управления системой отопления, обеспечивающий равенство мощности системы отопления и мощности тепловых потерь, позволяет минимизировать затраты тепловой энергии на отопление и обеспечить заданную температуру внутреннего воздуха при изменении текущей и прогнозной температуры наружного воздуха, а также при дежурном отоплении. Алгоритм обеспечивает быстрый выход на режим компенсации тепловых потерь без использования параметров температурного графика и параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных законов регулирования.

**Ключевые слова:** алгоритм адаптивного управления, программируемый логический контроллер, управление мощностью системы отопления, дежурное отопление.

# OPTIMIZATION OF HEATING MODES OF BUILDINGS AND STRUCTURES BY ADAPTIVE CONTROL

V.A. Tarasov, V.V. Tarasova, A.G. Kalinin, V.V. Afanasyev, V.G. Kovalev

The algorithm of adaptive control of the heating system implemented on a programmable logic controller ensures equality of the power of the heating system and the power of heat losses, minimizes the cost of thermal energy for heating and ensures the desired indoor air temperature when changing the current and predicted outdoor air temperature, as well as with standby heating. The algorithm provides a quick access to the heat loss compensation mode without using the parameters of the temperature graph and the parameters of proportional-integral and proportional-integral-differential laws of regulation.

**Keywords:** adaptive control algorithm, programmable logic controller, heating system power control, standby heating.

Для обеспечения внутри отапливаемых помещений заданной температуры внутреннего воздуха мощность системы отопления  $P_{\text{отоп}}$  должна компенсировать тепловые потери здания  $P_{\text{пот}}$  с учетом технологического и бытового поступления в отапливаемое здание тепловой энергии  $P_{\text{пост}}$ .

Расчетная мощность тепловых потерь зависит от тепловой характеристики здания и температур внутреннего и наружного воздуха

$$P_{\text{пот}} = qV(t_{\text{расч.вн}} - t_{\text{расч.нар}}), \quad (1)$$

где  $V$  – наружный строительный объем здания;  $q$  – удельная тепловая характеристика здания, которая должна учитывать реальные теплофизические характеристики ограждающих конструкций, форму и ориентацию здания, инфильтрацию, инсоляцию и влияние ветра. Произведение  $qV$  является обобщенной тепловой характеристикой здания.

Разность фактической или желаемой заданной температуры воздуха внутри здания и непрерывно измеряемой фактической или заданной температуры наружного воздуха  $t_{\text{расч.вн}} - t_{\text{расч.нар}}$  является основным возмущающим фактором для системы отопления.

Необходимая для компенсации тепловых потерь мощность системы отопления зависит от температур прямой и обратной воды и расхода воды в системе отопления:

$$P_{\text{отоп}} = G\rho c(t_{\text{под}} - t_{\text{обр}}) = P_{\text{пот}} - P_{\text{пост}}, \quad (2)$$

где  $G$  – объемный расход воды в контуре отопления здания;  $\rho$  – плотность воды;  $c$  – удельная теплоемкость воды;  $t_{\text{под}}$  и  $t_{\text{обр}}$  – температуры прямой и обратной воды в контуре системы отопления здания [1].

Качественное управление за счет температур прямой и обратной воды в соответствии с температурным графиком при неизменном расходе воды не может обеспечить полную компенсацию тепловых потерь, поскольку не учитываются ветер и инсоляция. Температура сетевой воды на тепловом источнике определяется по температуре воздуха за определенный период с учетом прогноза и располагаемой тепловой мощности оборудования. Транспортное запаздывание приводит к несоответствию у абонента температуры сетевой воды текущей наружной температуре. Температурный график часто не соблюдается, поэтому широко распространены алгоритмы управления отоплением, которые используют только температуры наружного и внутреннего воздуха, а также температуру воды в подающих магистралях и системах отопления, не могут обеспечить своевременную и полную компенсацию тепловых потерь. Следует отметить, что для реализации алгоритмов управления по температуре воды необходимы реперные точки графика отопительных систем и значения параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных законов регулирования.

Наличие в современных тепловых узлах датчиков расхода воды позволяет определять фактическую мощность системы отопления и вести управление непосредственно по мощности системы отопления исходя из равенства (2) с применением алгоритма адаптивного управления [2].

Внедренный на автоматизированном тепловом пункте корпуса «Д» Чувашского госуниверситета алгоритм адаптивного управления теплоснабжением зданий и сооружений с учетом погоднo-климатических и функциональных условий реализован на программируемом логическом контроллере (ПЛК) с регистрацией и визуализацией переменных на АРМ оператора в среде «CoDeSys» [3, 4]. Алгоритм обеспечивает быстрый выход на режим компенсации тепловых потерь без использования параметров температурного графика и параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных законов регулирования.

Математические модели нестационарных процессов в теплосетевых ограждениях позволяют осуществлять прогнозное управление и дежурное отопление по алгоритму адаптивного управления. Для исследования динамики тепловых процессов может быть применена модель, построенная на основе теплового баланса внутреннего воздуха и ограждающих конструкций с использованием квазистационарных приближений [5]. Дифференциальное уравнение теплового баланса для температуры внутреннего воздуха при принятых в теории автоматического управления обозначениях имеет вид [5]:

$$T_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} + t_{\text{в}} = kP_{\text{отоп}} + T_n \frac{dt_n}{d\tau} + t_n, \quad (3)$$

где  $T_{\text{в}}$  – постоянная времени для температуры внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$ ;  $T_n$  – постоянная времени для температуры наружного воздуха  $t_n$ ;  $k$  – коэффициент передачи по каналу «мощность системы отопления – температура внутреннего воздуха»,  $k = 1/q$ ;  $P_{\text{отоп}}$  – фактическая мощность системы отопления.

В стационарном режиме при компенсации тепловых потерь:

$$P_{\text{отоп}} = P_{\text{пот}} = qV(t_{\text{расч.вн}} - t_{\text{расч.нар}}).$$

В нестационарных режимах при прогнозном управлении и дежурном отоплении фактическая мощность системы отопления может отличаться от мощности тепловых потерь:

$$P_{\text{отоп}} = KP_{\text{пот}}.$$

Уравнение (3) легко решается для неизменной во времени температуры наружного воздуха, однако в реальности эта температура может существенно меняться, что необходимо учитывать при расчете режимов прогнозного управления и дежурного отопления.

Если принять допущение, что температура наружного воздуха в начальный момент времени  $\tau = 0$  равна  $t_{n0}$ , а затем стала меняться во времени по закону

$$t_n = B\tau^2 + t_{n0},$$

откуда

$$B = \frac{t_{nk} - t_{n0}}{\tau_r^2},$$

где  $t_{n0}, t_{nk}$  – температура наружного воздуха в начале и конце периода продолжительностью  $\tau$ , то скорость изменения температуры наружного воздуха в начальный момент времени равна нулю. При прогнозируемом похолодании  $B < 0$ , при потеплении  $B > 0$ . При постоянной температуре наружного воздуха  $B = 0$ .

При таком законе изменения во времени температуры наружного воздуха уравнение (3) имеет вид:

$$T_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} + t_{\text{в}} = kP_{\text{отоп}} + 2T_n B\tau + B\tau^2 + t_{n0}. \quad (4)$$

Начальные условия для решения уравнения (4):

$$\tau = 0, \quad t_v = t_{v0}, \quad t_n = t_{n0}. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) при начальных условиях (5) имеет вид:

$$t_v(\tau) = C \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_B}\right) + Y(\tau),$$

где

$$Y(\tau) = B\tau^2 - 2BT_B\tau + 2BT_B^2 + 2BT_n\tau - 2BT_B T_n + K(t_{v0} - t_{n0}) + t_{n0};$$

$$C = 2BT_B^2 - 2BT_B T_n + K(t_{v0} - t_{n0}) + t_{n0}.$$

Для частного случая стационарного режима при  $B = 0$  и коэффициенте  $K = 1$  фактическая мощность системы отопления равна мощности тепловых потерь:  $P_{\text{отоп}} = P_{\text{пот}}$ .

Если фактическая мощность системы отопления больше мощности тепловых потерь, температура внутреннего воздуха будет возрастать, если меньше – снижаться. Темп изменения температуры внутреннего воздуха зависит от коэффициента  $K$ . При отключении отопления  $K = 0$ , математическая модель позволяет оценить время охлаждения помещения с учетом изменения температуры наружного воздуха.

Разработанный и реализованный на ПЛК алгоритм адаптивного управления использует измеряемую температуру наружного воздуха, а также позволяет в любой момент времени задать уставку наружной температуры, обеспечивающую желаемый температурный режим [4]. При прогнозном управлении математическая модель позволяет определить значения коэффициента  $K$  и уставки температуры наружного воздуха, при которых температура внутреннего воздуха будет оставаться практически постоянной при изменении температуры наружного воздуха без недотопов и перетопов (рис. 1, 2).

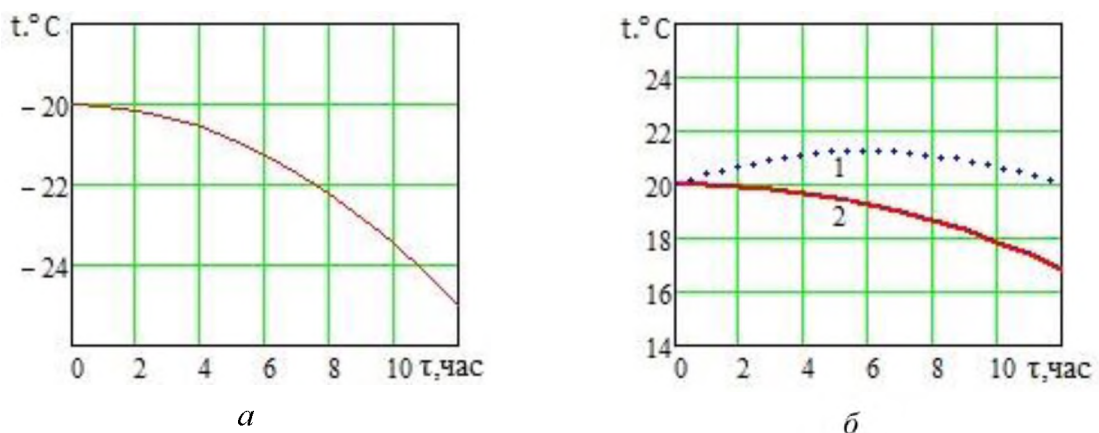


Рис. 1. Изменение температуры наружного воздуха (а) и температуры внутреннего воздуха (б) во время похолодания на 5 °С при мощности системы отопления, определенной по математической модели (1) и неизменной в течение периода похолодания мощности (2)

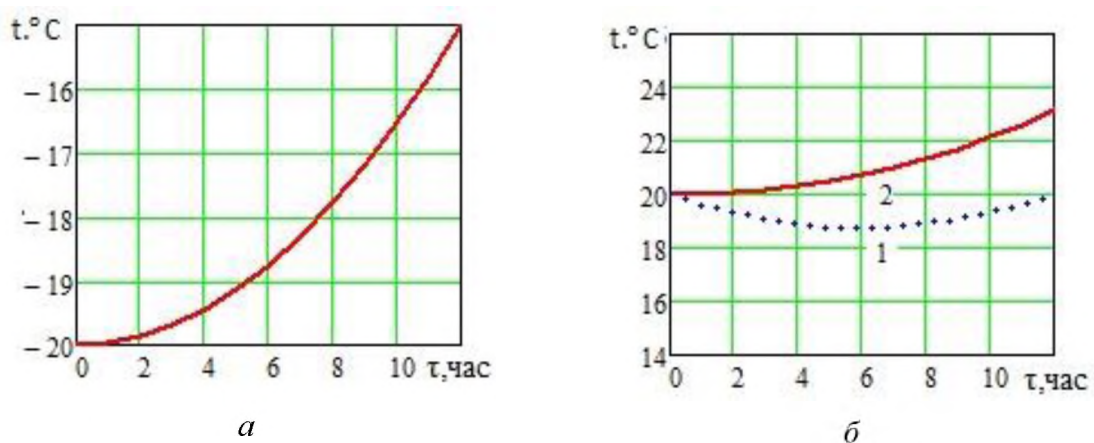


Рис. 2. Изменение температуры наружного воздуха (а) и температуры внутреннего воздуха (б) во время потепления на 5 °С при мощности системы отопления, определенной по математической модели (1), и неизменной в течение периода потепления мощности (2)

Энергосбережение достигается в динамике за счет прогнозного управления с учетом постоянных времени объектов.

При расчете режимов дежурного отопления математическая модель позволяет при заданных начальных и конечных температурах внутреннего воздуха определить значения коэффициента  $K$ , обеспечивающие желаемую температуру в конце заданного промежутка времен. При дежурном отоплении это температура в конце интервала охлаждения или натопа. Алгоритм адаптивного управления позволяет обеспечить любые расчетные режимы.

### Список литературы

1. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений / В.В. Афанасьев [и др.] // Вестник Чувашск. ун-та. 2015. № 2. С. 20–28.
2. Разработка алгоритма адаптивного управления теплоснабжением автоматизированным тепловым пунктом / В.В. Тарасова [и др.] // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. докл. IV Поволжской науч.-практ. конф. Казань, 2018. С. 43–53.
3. Модернизация теплового пункта корпуса с установкой системы автоматического управления отоплением с программируемым контроллером / В.А. Тарасов [и др.] // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Чебоксары, 2015. Вып. XI. С.152–160.
4. Реализация алгоритма адаптивного управления теплоснабжением зданий и сооружений: свид. о гос. рег. программ для ЭВМ № 2017613938; от 05.04.17.

5. Панферов В.И., Анисимова Е.Ю., Нагорная А.Н. К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник Южно-Уральск. гос. ун-та. Челябинск, 2006. № 14. С. 128–133.

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Наталья Владимировна Роженцова<sup>1</sup>, Алсу Ренатовна Галяутдинова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>natalia15969@yandex.ru, <sup>2</sup>Alsu296@ya.ru

В статье рассматривается анализ повреждаемости силовых трансформаторов на основе статистических данных.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, отказ, надежность работы, срок службы, повреждения, техническое обслуживание, обследование, причины повреждений.

## ANALYSIS OF DAMAGE OF POWER TRANSFORMERS

N.V. Rozhentsova, A.R. Galyautdinova

The article deals with the analysis of the damage of power transformers on the basis of static data.

**Keywords:** the power transformer, a failure, a reliability, the service life, a damage, a maintenance, an inspection, the causes of damage.

Надежность электрических сетей, электростанций и энергосистем во многом зависит от надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов, так как они являются наиболее массивными элементами электростанций и электрических сетей. Большинство силовых трансформаторов находятся в эксплуатации сверх назначенного ресурса в 1,5–2 раза (срок службы). В этих условиях модернизация системы обслуживания трансформаторов с длительным сроком службы выдвигает задачу поддержания их работоспособности, а также надежности электроснабжения в целом.

Большое число трансформаторов с большим сроком службы приводит к спорной ситуации при определении «паркового» ресурса. Основываясь только на действующие нормативные акты, невозможно получить адекватное представление о фактическом состоянии трансформаторов с большим сроком службы. Технология комплексного обследования позволяет получить данные по всем стареющим трансформаторам в ближайшие 15–20 лет. Достоинством этого метода является то, что не требуется обязательной информации о предшествующих характеристиках оборудования.



В настоящее время имеется достаточный научный и практический опыт оценки и прогнозирования ресурса силовых трансформаторов. Однако нормативного документа, регламентирующего процесс продления срока службы силовых трансформаторов, не существует. В соответствии с Федеральным законом № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» силовые трансформаторы подлежат обязательной экспертизе промышленной безопасности технических устройств, применяемых на опасных производственных объектах. В процессе эксплуатации силовых трансформаторов необходимо проводить диагностику и техническое обслуживание с целью безопасной и безаварийной эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла трансформатора (25–30 лет). Диагностика и обслуживание трансформаторов показывает процесс старения силовых трансформаторов в процессе эксплуатации. Обнаружение дефектов на начальной стадии позволяет поддерживать надежную работу трансформаторов, помогает определить «жизненный цикл» и облегчает планирование их замены. Эффективная программа диагностических испытаний позволяет уменьшить вероятность образования дефектов и выхода из строя трансформаторов.

Оценка технического состояния силовых трансформаторов в эксплуатации проводится по совокупности контролируемых показателей и их нормативов. Основным документом, регламентирующим перечень испытаний силовых трансформаторов и высоковольтных вводов при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации, является РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Значительное количество силовых трансформаторов, эксплуатируемых на российских энергетических предприятиях, эксплуатируются более 25 лет, отработав срок службы, установленный ГОСТ 11677-85, – 25 лет [1]. Трансформаторы, изготовленные по ГОСТ 11677-65, имеющие недостаточное электродинамическое сопротивление повышенным токам короткого замыкания в энергосистемах, эксплуатируются на российских энергетических предприятиях. Расчетная мощность трехфазного короткого замыкания в сетях 6–750 кВ в 2,5 раза больше, чем принято в ГОСТ 11677-65 [2].

Статистика отказов в России за 2010–2017 годы показала, что десять случаев из пятнадцати – повреждения высоковольтных вводов 110 кВ силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации менее 5 лет, которые имеют основную причину повреждения – заводской брак производства. Данные, приведенные в таблице, взяты из баз данных сетевых предприятий и генерирующих компаний. Основным повреждением силовых трансформаторов в процессе эксплуатации, как показано на рисунке, является повреждение устройств РПН, изоляции или обмоток.

Анализ повреждаемости силовых трансформаторов

| Трансформаторы с уровнем напряжения                            | Повреждаемость трансформаторов от общего числа эксплуатируемых силовых трансформаторов, % |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Трансформаторы напряжением 110 кВ                              | 40                                                                                        |
| Трансформаторы напряжением 110–500 кВ мощностью 63 МВА и более | 46                                                                                        |
| Трансформаторы напряжением 35 кВ                               | 32                                                                                        |
| Трансформаторы напряжением 20–10 кВ                            | 30,7                                                                                      |

Возможными причинами повреждений являются развитие дефектов под влиянием эксплуатационных факторов, ошибочные или недостаточные действия при монтаже, ремонте и эксплуатации.

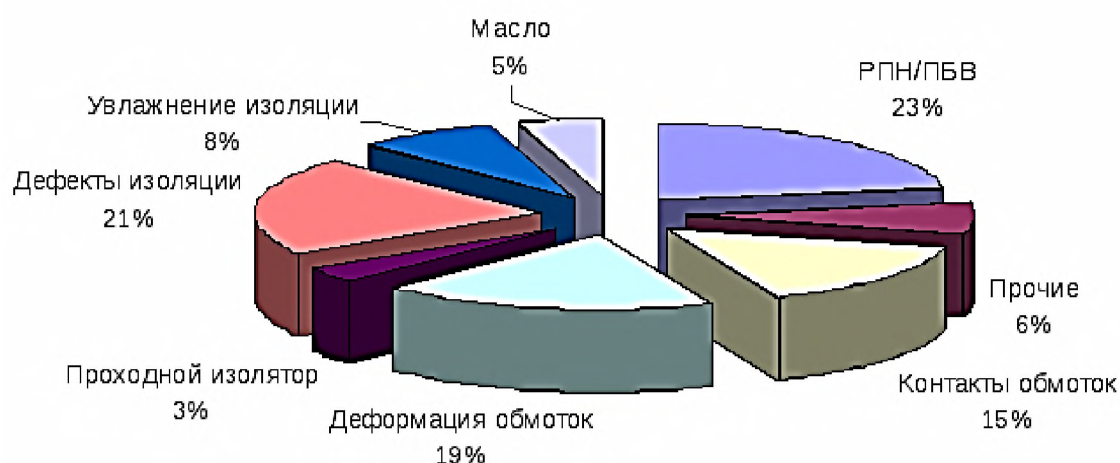


Рис. 1. Повреждаемость силовых трансформаторов 110 кВ

Удельная повреждаемость трансформаторов, разработанных до 80-х годов прошлого столетия, превышает 1 % в год, у новых она составляет около 0,2 % [3]. В разных странах существуют различные подходы к анализу повреждаемости, трактовке самого понятия и к формированию статистических данных, что не позволяет проводить корректное сравнение. В развитых странах удельная повреждаемость силовых трансформаторов оценивается не более 1,5–2 % в год [4–6].

Благодаря высокой эффективности системы диагностики и ремонтного обслуживания трансформаторного оборудования реализуется концепция перехода от нормативно-календарного планирования ремонтов к их проведению по состоянию (т.е. в зависимости от фактического технического состояния). В соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации

(ПТЭ) [7, 9] капитальный, текущий ремонт трансформаторов и их составных частей (РПН, система охлаждения и др.) выполняются по мере необходимости, в зависимости от технического состояния, определяемого испытаниями и визуальным осмотром.

Новым направлением в развитии системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является разработка методов, которые основываются на наблюдениях за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации [11]. Главной целью эксплуатации электроэнергетических систем является переход от системы предупредительно-плановых ремонтов к ремонту на основе использования результатов [8], что непосредственно повысит надежность работы оборудования, позволит эффективнее управлять процессами ТОиР, а также снизит издержки энергетических компаний на эксплуатационные работы парка оборудования [10].

### Список литературы

1. ГОСТ 11677-85. Силовой трансформатор. Общая характеристика. М.: Изд-во стандартов, 1986.
2. ГОСТ 11677-65. Трансформаторы (автотрансформаторы) силовые. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1971.
3. Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов // Изв. Акад. науки. Энергия. 2008. № 1. С. 45–69.
4. Алексеев Б.А. Мониторинг (диагностика) состояния крупных силовых трансформаторов. М.: NC Enas, 2002. 216 с.
5. РД 153-34.346.34-00. Положение об экспертной системе контроля и оценки состояния и условий эксплуатации силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения. М.: РАО «ЕЭС России», 2000. 15 с.
6. Правила технической эксплуатации электростанций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЕС, 2003. 250 с.
7. Коган Ф.Л. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. М.: АО «Фирма ОРГРЭС», 2003. 493 с.
8. Диагностика электрооборудования промышленных предприятий: метод. указания к лаб. раб. / Н.В. Роженцова [и др.]. Казань: КГЭУ, 2010. 17 с.
9. Гусев А.С., Денисова А.Р. Преимущества использования когенераторных установок в виде мини-ТЭЦ // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. Тольятти: КТИ (ф) ВолгГТУ, 2016. С. 64–65.

10. Роженцова Н.В., Денисова А.Р., Рудаков А.И. Современные технические средства повышения энергоэффективности водокольцевых машин // Промышленная энергетика. 2014. № 5. С. 27–30.

11. Ivanova V.R., Ivanova A.S., Fetisov L.V. The development of an Automated Station for Group Soldering of the Led Lines // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2018. P. 336–338.

УДК 621.311.21/ББК 31.57

## **АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ UNREAL ENGINE 4 ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЭС**

Татьяна Дмитриевна Белова<sup>1</sup>, Дмитрий Александрович Грешных<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «НГТУ», г. Новосибирск

<sup>1</sup>belova.tatiana2010@yandex.ru, <sup>2</sup>dima.greshnyh@yandex.ru

В данной статье были рассмотрены такие перспективные средства, используемые при проектировании объектов гидроэнергетики и в образовательной деятельности, как визуализация и 3D-моделирование. С помощью таких средств была разработана лабораторная работа по дисциплине «Гидроэнергетика» на тему «Расчет и выбор гидротурбины и генератора для гидроэлектростанции».

**Ключевые слова:** гидроэнергетика, проектирование, гидротурбина, гидрогенератор, 3D-моделирование, возобновляемая энергетика.

## **ANALYSIS OF UNREAL ENGINE 4 APPLICATION FOR THE DESIGN OF THE MAIN EQUIPMENT OF HPS**

T.D. Belova, D.A. Greshnykh

This article discusses such promising tools used in the design of hydropower facilities and in educational activities as visualization and 3D-modeling. With the help of such tools was developed laboratory work on the course “Hydropower” on the topic: “Calculation and selection of hydro turbines and generators for hydroelectric power”.

**Keywords:** hydropower engineering, design, hydro turbine, hydro generator, 3D-modeling, renewable energy.

Современный мир непрерывно развивается, с каждым годом технологии становятся все сложнее, а открытия в науке дают массу новых возможностей, следовательно, и учебный процесс должен совершенствоваться. Основной задачей высшего учебного заведения является подготовка специалистов, способных своевременно реагировать на изменения, которые происходят в мире. Поэтому для подготовки студентов к профессиональной деятельности используются современные способы обучения.

Наиболее перспективные способы для реализации лабораторных работ по техническим дисциплинам – это визуализация и 3D-моделирование. Изучим эти понятия.

Визуализация – это процесс представления данных в виде изображения с целью максимального удобства их понимания. Известно, что от 80 до 90 % информации воспринимается человеком визуально, в том числе и учебная информация, поэтому визуализация повышает эффективность обучения. Восприятие и воспроизведение визуальной информации требуют меньше времени по сравнению с вербальной [1].

3D-моделирование – это процесс создания трёхмерной модели какого-либо объекта, который может быть реальным или абстрактным. Моделирование позволяет рассматривать объект с разных сторон, соотносить габариты.

На данном этапе развития факультета энергетики НГТУ дисциплина «Гидроэнергетика» преподается студентам четвертого курса, обучающимся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». Эта дисциплина изучает научные, технические, экологические принципы использования водной энергии, а также особенности конструкции ГЭС.

Лабораторные работы являются неотъемлемой частью обучения в техническом вузе, ведь с их помощью студент получает различные практические навыки [2]. В настоящее время по этой дисциплине проводится лабораторная работа на стенде. Однако стенд не дает возможности хорошо понять и представить различные процессы, происходящие при производстве электроэнергии с помощью энергии водного потока.

Поэтому и было принято решение разработать и внедрить новую лабораторную работу по гидроэнергетике, где были применены современные способы обучения, для лучшего понимания происходящих процессов.

В дисциплине «Гидроэнергетика» важна визуальная составляющая. Моделирование помогает студенту рассмотреть статор, ротор, вращающиеся части подпятника, лопасти турбины, что в реальных условиях невозможно из-за технологических особенностей производства электричества.

Первым этапом создания лабораторной работы является написание методических указаний, где содержатся основные теоретические сведения по заданной теме, а также указания к непосредственному выполнению работы, варианты заданий.

Тема созданной лабораторной работы – «Расчет гидротурбины и гидрогенератора для гидроэлектростанции».

Целью лабораторной работы является выбор гидротурбины и гидрогенератора для ГЭС.

Задачи данной лабораторной работы:

1. Изучение типов гидротурбин и их применения.
2. Расчет основных параметров гидротурбины.
3. Выбор системы и типа гидротурбины для ГЭС по заданным параметрам.
4. Расчет параметров гидрогенератора и требований к нему.
5. Выбор гидрогенератора.

После выполнения лабораторной работы студент должен приобрести навыки выбора гидротурбины и гидрогенератора, а также получить информацию о различных гидротурбинах и ознакомиться с конструкцией гидроагрегатов (ГА).

Для создания лабораторной работы было необходимо подобрать программное обеспечение, способное реализовать методы интерактивной визуализации. Для этой задачи подходили следующие два программных пакета – UnrealEngine 4 и Unity 3d. После анализа преимуществ был выбран UnrealEngine 4, интерфейс которого представлен на рис. 1, а.

Функциональные возможности UnrealEngine 4 позволяют создавать интерактивные приложения, с возможностью симуляции физических законов и управляемыми в реальном времени процессами.

Создание трехмерных моделей, используемых в лабораторной работе, производилось в Autodesk Maya, процесс создания отображён на рис. 1, б [3]. Главным фактором выбора стала относительно недавно появившаяся функция автоматического экспорта 3D-моделей в Unreal Engine 4.

Для данной работы было необходимо выполнить модели следующих типов гидротурбин: радиально-осевая, поворотной-лопастная и диагональная поворотной-лопастная, а также гидрогенератор с подвесным или зонтичным подпятником (рис. 1). Выбор конкретных элементов ГА основывается на результатах расчётов, проводимых студентом исходя из своего варианта, пример ГА представлен на рис. 3.

При создании расчётной части программы использовалась встроенная в UE4 система программирования Blueprints. Это система визуального программирования в Unreal Engine 4. Она является быстрым способом создания прототипов игр. Вместо построения написания кода всё можно делать визуально: перетаскивать ноды (узлы), задавать их свойства в интерфейсе и соединять их «провода».

Несмотря на кажущуюся легкость, это мощный инструмент реализации логических цепей, ведь по сути внутри каждого элемента уже находится код, написанный на C++. Хотя для конечной доработки всё же используется C++, так как с его помощью можно провести более детальную отладку логики.

Именно при помощи Blueprints в программе реализуется настраиваемая анимация, за счёт указания необходимых точек перемещения, углов поворота и скоростей.

Преимуществом лабораторной работы можно считать систему тестов, позволяющую акцентировать внимание студентов на определённых теоретических аспектах в процессе выполнения расчётов (рис. 2, б). В справочных материалах лабораторной работы помимо данных, необходимых для расчётов, находится теоретическая информация для подготовки к тестовым заданиям.

Расчёт, проводимый студентом в программе, заносится в итоговые таблицы для турбин, где проводится сравнение и выбор оптимального варианта турбины и характеристик рассчитываемого генератора.

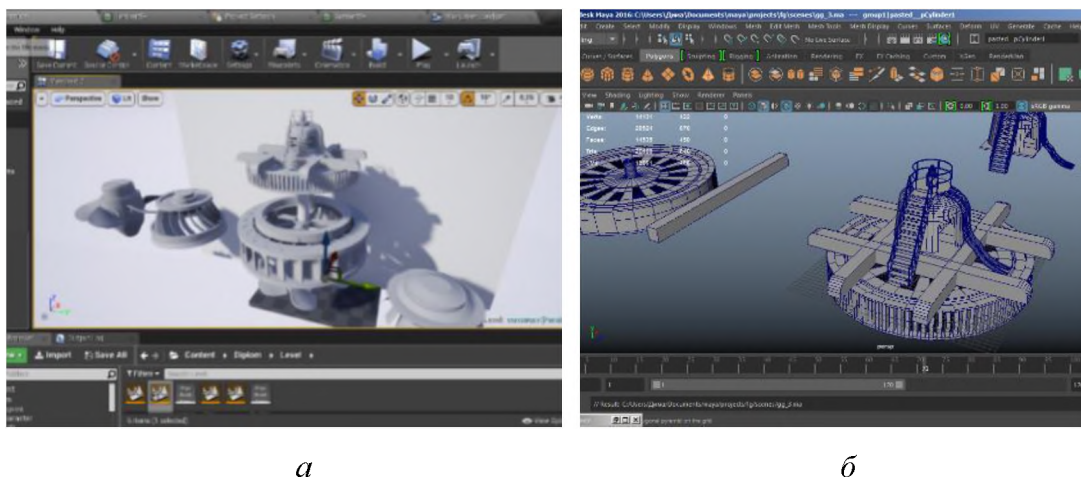


Рис. 1. Интерфейс программ UnrealEngine 4 и AutodeskMaya

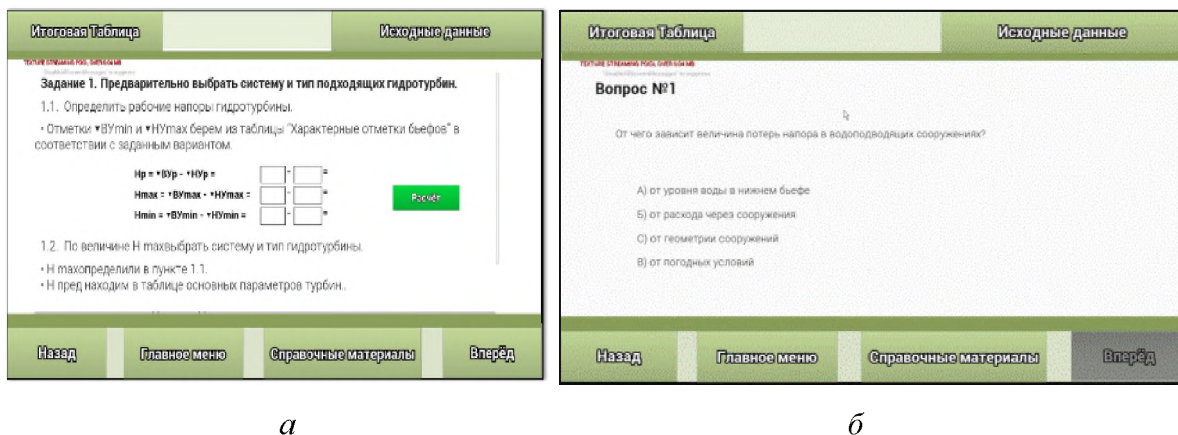


Рис. 2. Интерфейс лабораторной работы



В статье были рассмотрены современные способы, помогающие в образовательной деятельности и при проектировании объектов гидроэнергетики, такие как визуализация и 3D-моделирование. Полученные в результате модели легли в основу лабораторная работа по дисциплине «Гидроэнергетика», в ходе которой у студентов должно появиться понимание принципов выбора гидроагрегатов. Также студент в процессе выполнения работы получает знания основных типов и конструкций гидроагрегатов. В настоящий момент было проведено пробное внедрение данной лабораторной работы в учебный процесс. Работу успешно выполнили более 50 студентов. Опросы, проведенные среди учащихся, помогут выявить и устранить недочеты, допущенные в создании лабораторной работы, а также учесть пожелания студентов.

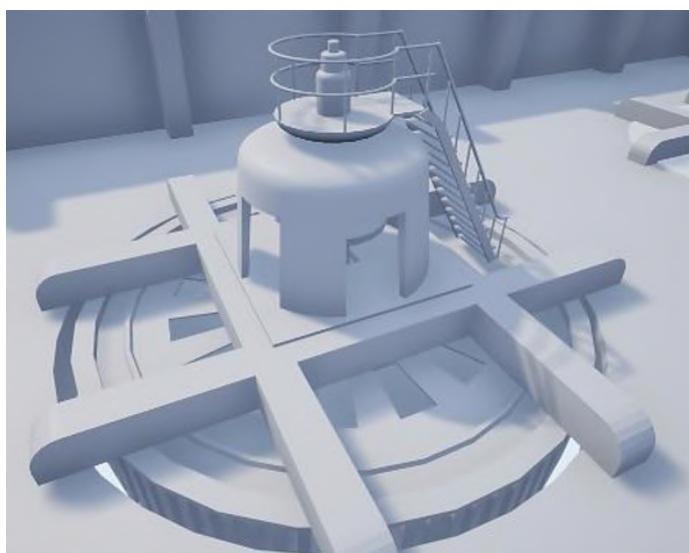


Рис. 3. Конструкция гидроагрегата

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы об использовании Unreal Engine 4 при проектировании основного оборудования ГЭС:

1. Программный пакет имеет достаточно высокий функционал для выполнения визуализации при проектировании гидроагрегатов, простоты в работе с 3D моделями, составлении и использовании справочных материалов и тестов.

2. В процессе разработки и внедрения были замечены некоторые сложности: программа не оптимальна для расчета в учебных условиях; высокие требования к техническим характеристикам компьютера.

В целом можно заключить, что UE можно использовать для реализации задач проектирования как основного оборудования ГЭС, так и в энергетике в целом.



## Список литературы

1. Кротова И., Камазова Т., Донченко Н. Метод визуализации в системе инновационного обучения. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-vizualizatsii-v-sistemeinnovatsionnogoobucheniya>.
2. Использование водной энергии: учеб. пособие: в 2-х ч. / Ю.А. Секретарев [и др.]; Сиб. Федерал. ун-т, Саяно-Шушенский филиал. Саяногорск, 2014. Ч. 1. 108 с.
3. Неудахина Н.А. О возможностях практического внедрения технологии визуализации учебной информации в вузе. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/o-vozmozhnostyah-prakticheskogo-vnedreniyatehnologii-vizualizatsii-uchebnoy-informatsii-v-vuze>.
4. Цыпцын С. Понимая МАЯ. М.: Изд-во ООО Арт Хаус медиа, 2007. 1428 с.

УДК 621.314

## О МЕСТЕ ЭЛЕКТРИКИ В РЯДУ НАУК ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Борис Иванович Кудрин

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва  
coenose@rambler.ru

В краткой статье показана назревшая необходимость изменения статуса науки электрики и утверждения её равноправия в ряду «электроэнергетика – электротехника – электрика».

**Ключевые слова:** уровни системы электроснабжения, граница раздела «энергосистема – потребитель», электрооборудование, качество электроэнергии, электроснабжение, экономия электроэнергии, электрик.

## ABOUT ELECTRICAL PLACE INTO A SERIES OF ELECTRIC SCIENCES

B.I. Kudrin

In a brief article shows the urgent need to change the status of the science of electrical engineering and the approval of its equality in a number of “electrical power engineering – electrical engineering”.

**Keywords:** levels of power supply system, the boundary of the section “power system – consumer”, electrical equipment, power quality, electricity, energy saving, electrician.

Общепризнано усложнение и качественное изменение вертикальных и горизонтальных связей и составляющих элементов, действующих в экономике страны, внутри отрасли, отдельного промышленного предприятия, комплекса, при изготовлении любого изделия. Всё количество уже производимых изделий должно быть обеспечено ресурсами и сейчас, и на перспективу, когда неизбежны объёмные и ассортиментные изменения.

Это требует и будет требовать значительных производственных инвестиций и средств для НИОКР. Но всё ещё не осознано качественное изменение и назначение проектирования, обусловленное научно-технической революцией.

Научный анализ процесса проектирования начался лишь с 50-х годов прошлого века, когда стали говорить о теории проектирования систем, *systems engineering*. Выделение теории объяснялось сложностью объектов, которыми следует управлять: проектирование сразу рассматривалось как необходимый элемент управления и планирования.

К 1990 г. в стране насчитывалось около 1800 проектных организаций. Сейчас произошла специализация проектировщиков по отраслям.

При рассмотрении сущности инженерного проектирования само понятие толкуется максимально широко. Но анализ применения этого понятия в науке и технике, в массовой печати показывает, что проектирование сводят к подготовке проектной документации на новые машины, оборудование, приборы и другие изделия, на новые технологические процессы, на новые материалы, что мы в дальнейшем будем называть проектированием изделий (конструированием).

Проектная документация на инвестиционное строительство имеет различное название: проектно-сметное дело (как его называют в официальных документах); архитектурно-строительное и технологическое (в зарубежной литературе обозначаемое, соответственно, как *civil-engineering aspect of a design*, а также *engineering design*: технологический проект часто понимают в узком смысле – как основную технологию цеха); проектно-изыскательские работы. Инвестиционный замысел предполагает определение цели исследования, назначения, мощности, номенклатуры выпускаемой продукции, района размещения объекта. Проектная организация, выигравшая тендер, разрабатывает материалы Обоснования инвестиций.

При этом на практике следует отличать электротехнику как науку о применении электрической энергии в практических целях: это отрасль техники, осуществляющая изготовление электротехнических изделий для всех отраслей народного хозяйства, военного дела и быта.

Электроэнергетика – отрасль науки, занятая генерацией электроэнергии, её передачей и распространением.

Наконец, электрика – область народного хозяйства (и науки), включая электрику промышленности и транспорта, объектов агропрома, коммунально-бытовой сферы, спорта, культуры, науки, обороны и др.

Определение границ раздела потребитель – энергосистема (от высшего уровня системы электроснабжения до единичного электроприёмника первого уровня) – один из важнейших вопросов во взаимоотношениях субъектов.

Все три науки существуют самостоятельно, хотя в государственном масштабе предпочтение может отдаваться, например, электроэнергетике. Однако анализ расхода электроэнергии по регионам за 1990–2018 гг. показывает необходимость резкого изменения подхода к электрификации всей России, которая большей частью до сих пор остаётся неэлектрифицированной.

Таким образом электрика в области науки и техники это такая же равноправная отрасль экономики, сфера деятельности по использованию электроэнергии. И без чёткого осознания дипломированными электриками этой очевидной истины будет трудновато.

Возникновение электрики как науки определено периодом индустриализации, формированием объекта исследования и управления (электрического хозяйства потребителя); разработкой собственных методов расчёта параметров и объёмов потребляемой электроэнергии объектами электрики; созданием ценологического математического аппарата исследования; решением специфических задач электроменеджмента, включая энергосбережение. Глобальность электрики порождает ключевую проблему XXI века – рациональное использование электроэнергии в условиях многократного роста абсолютных величин электропотребления.

В тридцатые годы прошлого столетия электрика как дисциплина впервые была озвучена в МЭИ; и сегодня в МЭИ большую работу в этом направлении ведёт кафедра Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий (ЭППЭ).

Надо надеяться, что в будущем названия предстоящих всероссийских и региональных научно-технических совещаний и конференций типа «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники...» будут несколько дополнены и станут определяться как «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики, электротехники и электрики».

УДК 621.315.14:621.316.11

## **РАСЧЁТ ПОТЕРЬ НА КОРОНУ ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ СЕЧЕНИЙ ВЛ 110, 220 кВ**

Максим Валерьевич Володарский<sup>1</sup>, Андрей Александрович Дюдяков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва  
<sup>1</sup>taymax1997@mail.ru, <sup>2</sup>dyudyakov1997@mail.ru

Рассмотрены основные факторы, влияющие на величину потерь на корону для ряда стандартных сечений сталеалюминевых проводов на воздушных ЛЭП напряжением 110 и 220 кВ, проведена оценка эффективности увеличения сечения как метода борьбы с потерями на корону.

**Ключевые слова:** распределительные сети высокого напряжения, потери на корону.

## COUNTING OF THE CORONA LOSSES FOR A STANDARD RANGE OF CROSS-SECTIONS OF THE ACSR WIRES FOR 110 AND 220 KV

M.V. Volodarskiy, A.A. Dyudyakov

In this report was considered main factors, affecting on the corona losses for a standard range of cross-sections of the ACSR wires used on overhead distribution lines of 110–220 kV. Also, was evaluated the effectiveness of the increasing of the cross-section as a method of reducing corona losses.

**Keywords:** corona losses, distribution lines high voltage.

В связи с ограниченностью энергоресурсов, стремительным изменением экономических условий и ростом цен на электроэнергию вопрос сокращения потерь при передаче электроэнергии актуален как никогда. И если во времена СССР конструкция ВЛ определялась минимумом приведенных затрат на её сооружение и эксплуатацию, которые учитывали нагрузочные потери и потери на корону, то в современных экономических расчётах соотношения ценовых показателей значительно изменились. Однозначно сказать, сколько стоит электроэнергия на данный момент, крайне проблематично, поскольку тарифные планы строятся в зависимости от большого количества факторов. Если усреднить данные, предоставляемые Мосэнергосбытом для юридических лиц, можно получить 300–330 коп./( $\text{kBt} \cdot \text{ч}$ ). В 1985 г. цены на электроэнергию составляли 1,3–1,8 коп./( $\text{kBt} \cdot \text{ч}$ )., из этого следует, что электроэнергия стала дороже в 242 раза. Укрупненные показатели стоимости строительства одноцепной ВЛ на напряжение 110 кВ по [1] на 1985 г. составляют 20 тыс. руб./км, а аналогичные показатели для строительства линии по [2] на 2012 г. составляют 1 100 тыс. руб./км. В пересчете на сегодняшний день с учётом инфляции удельная стоимость составляет 1 752 тыс. руб./км, т. е. исходя из усредненных показателей в среднем увеличилась в 87,6 раза. Из этих соотношений можно сделать вывод о том, что цены на электроэнергию растут в 2,76 раза быстрее, нежели цены на строительство ВЛ. В таких условиях руководствоваться рекомендациями ПУЭ, допускающими внушительные потери электроэнергии, при выборе конструкции воздушных линий становится менее целесообразно.

Для расчёта выбраны стандартные сечения, приведенные в ГОСТ 839-80. Первым этапом расчета потерь на корону является расчет емкостей фаз ВЛ по методике, приведенной в [3].

Существенное влияние на ёмкости фаз оказывает расстояние между фазными проводами, высота подвеса проводов и диаметр провода. Ввиду

того, что все эти величины могут значительно различаться даже для ВЛ одной ступени напряжения, расчет проведен для конкретных опор. На напряжение 110 кВ в качестве расчётной была использована опора УС110-3, а для напряжения 220 кВ в качестве расчетной использовалась опора ПС220П-4Т. После расчёта ёмкостей по максимальному рабочему напряжению для данной ступени вычисляется амплитуда фазного напряжения  $U_m$ , которую вместе с емкостью используют для нахождения заряда на фазе ВЛ по формуле (1):

$$q_i = C_i \cdot U_m. \quad (1)$$

Затем по формуле (2) определяются амплитуды средних напряжённостей поля на поверхности проводов:

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\sum_{i=1}^3 q_i}{3r_0}. \quad (2)$$

Величина напряжённости поля  $E_n$ , при которой корона охватывает весь провод, определяется по формуле:

$$E_n = 30,3 \cdot m \cdot \delta \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r_0}} \right), \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус провода, см;  $\delta$  – относительная плотность воздуха;  $m$  – коэффициент гладкости для витого провода, принят равным 0,82.

Далее учитывается влияние погодных условий. В расчёте участвуют следующие основные виды погоды: хорошая погода (без осадков); дождь, включая мокрый снег; снег; изморозь. Функции  $F_{\text{х.п}}(E_{\text{ср}}/E_n)$ ,  $F_{\text{д}}(E_{\text{ср}}/E_n)$ ,  $F_{\text{с}}(E_{\text{ср}}/E_n)$ ,  $F_{\text{из}}(E_{\text{ср}}/E_n)$  построены как средние по опытным точкам и приведены в [3]. Для дальнейшего вычисления потерь на корону необходимые данные по погодным условиям, а конкретно – количество часов в год для каждого из погодных явлений, перечисленных выше:  $T_{\text{х.п}}$ ,  $T_{\text{д}}$ ,  $T_{\text{с}}$  и  $T_{\text{из}}$ . Поскольку значения потерь для различных видов погодных явлений могут отличаться на порядок, их время продолжительности будет играть значительную роль. Далее выполнено два расчёта по усредненным данным продолжительности погодных условий из [3] для района с умеренным климатом и по данным, приведенным для Москвы в [4]. Для сравнения данные по погодным условиям из [3] и [4] приведены в табл. 1.

Далее для отношений  $E_{\text{ср}}/E_{\text{н}}$  для каждого вида погоды получаем значение функций  $F_{\text{х.п}}(E_{\text{ср}}/E_{\text{н}})$ ,  $F_{\text{д}}(E_{\text{ср}}/E_{\text{н}})$ ,  $F_{\text{с}}(E_{\text{ср}}/E_{\text{н}})$ ,  $F_{\text{из}}(E_{\text{ср}}/E_{\text{н}})$  по кривым, приведенным в [3].

Таблица 1

Сравнение данных погодных условий

| Источник | $T_{\text{х.п}}, \text{ ч}$ | $T_{\text{д}}, \text{ ч}$ | $T_{\text{с}}, \text{ ч}$ | $T_{\text{из}}, \text{ ч}$ |
|----------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| [3]      | 7235                        | 500                       | 800                       | 225                        |
| [4]      | 7035                        | 644                       | 790                       | 291                        |

Суммарные потери на корону для ВЛ на километр длины вычисляются по следующей формуле:

$$P_{\text{кор}} = \frac{r_0^2}{8760} \cdot E_{\text{ср}} \cdot 3 \cdot \left[ F_{\text{х.п}} \cdot \left( \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{н}}} \right) \cdot T_{\text{х.п}} \cdot \delta^2 + F_{\text{д}} \cdot \left( \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{н}}} \right) \cdot T_{\text{д}} + F_{\text{с}} \cdot \left( \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{н}}} \right) \cdot T_{\text{с}} + F_{\text{из}} \cdot \left( \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{н}}} \right) \cdot T_{\text{из}} \right]. \quad (4)$$

Результаты расчётов сведены в табл. 2 и визуализированы на рис. 1 и 2 в виде графиков зависимости потерь от диаметра провода.

Таблица 2

Расчет потерь на корону для ВЛ 110–220 кВ

| 110 кВ     |             |                              |                              | 220 кВ     |             |                              |                              |
|------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------|-------------|------------------------------|------------------------------|
| Сечения АС | Диаметр, мм | $P_{\text{кор}}$ [3], кВт/км | $P_{\text{кор}}$ [4], кВт/км | Сечения АС | Диаметр, мм | $P_{\text{кор}}$ [3], кВт/км | $P_{\text{кор}}$ [4], кВт/км |
| 70/11      | 11,40       | 0,308                        | 0,373                        | 240/32     | 21,60       | 2,478                        | 2,888                        |
| 70/72      | 15,40       | 0,145                        | 0,175                        | 240/56     | 22,40       | 2,330                        | 2,738                        |
| 95/16      | 13,50       | 0,196                        | 0,237                        | 300/39     | 24,00       | 1,948                        | 2,305                        |
| 95/141     | 19,80       | 0,083                        | 0,098                        | 300/48     | 24,10       | 1,951                        | 2,294                        |
| 120/19     | 15,20       | 0,143                        | 0,173                        | 300/66     | 24,50       | 1,872                        | 2,216                        |
| 120/27     | 15,40       | 0,139                        | 0,168                        | 300/204    | 29,20       | 1,208                        | 1,446                        |
| 150/19     | 16,80       | 0,115                        | 0,138                        | 330/30     | 24,80       | 1,774                        | 2,098                        |
| 150/24     | 17,10       | 0,105                        | 0,126                        | 330/43     | 25,20       | 1,695                        | 2,012                        |
| 150/34     | 17,50       | 0,095                        | 0,115                        | 400/18     | 26,00       | 1,649                        | 1,950                        |
| 185/24     | 18,90       | 0,078                        | 0,094                        | 400/22     | 26,60       | 1,570                        | 1,830                        |
| 185/29     | 18,80       | 0,078                        | 0,093                        | 400/51     | 27,50       | 1,510                        | 1,777                        |
| 185/43     | 19,60       | 0,069                        | 0,083                        | 400/64     | 27,70       | 1,440                        | 1,722                        |
| 185/128    | 23,10       | 0,048                        | 0,0058                       | 400/93     | 29,10       | 1,203                        | 1,440                        |
| 240/32     | 21,60       | 0,049                        | 0,060                        | —          | —           | —                            | —                            |
| 240/56     | 22,40       | 0,048                        | 0,059                        | —          | —           | —                            | —                            |

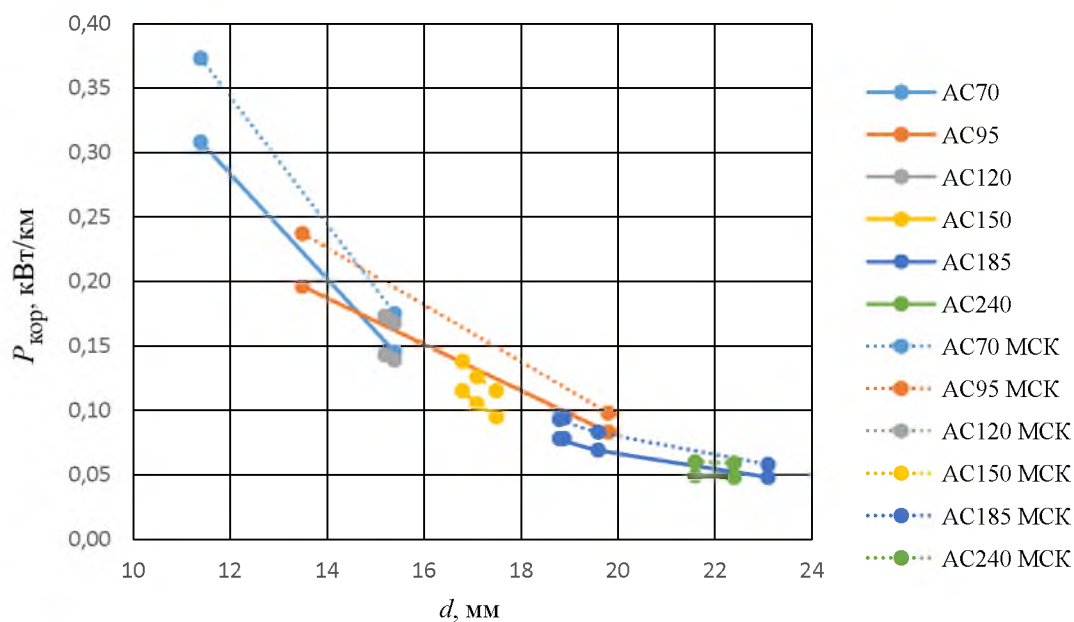


Рис. 1. Графики зависимостей потерь от диаметра провода

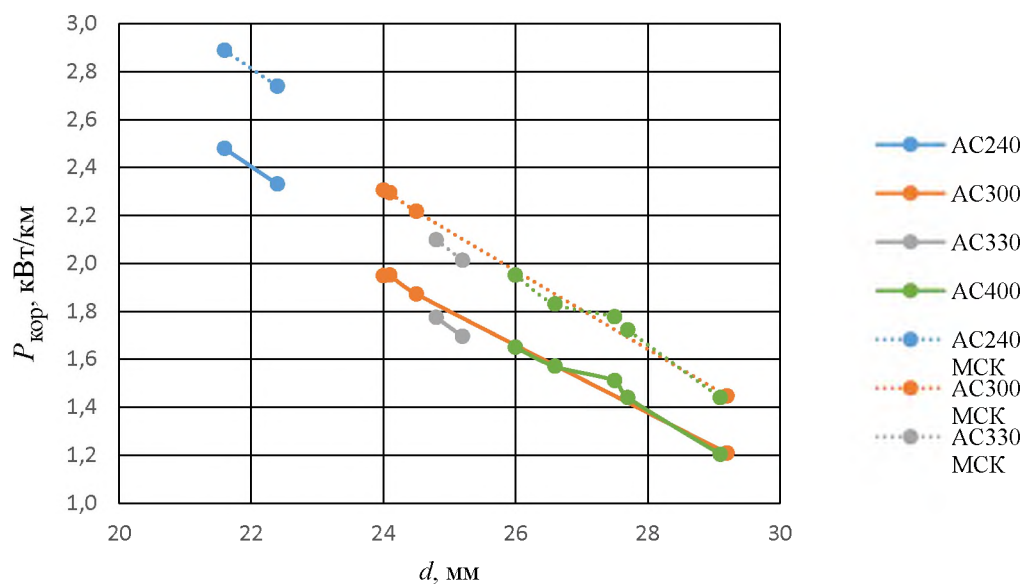


Рис. 2. Графики зависимостей потерь от диаметра провода

Как видно из графиков, потери на корону уменьшаются с ростом диаметра провода. Этого можно добиться, изменяя сечение алюминиевой или стальной составляющей провода.

Выбирая большое сечение стального сердечника, приходится увеличивать несущую способность опор ЛЭП, что приводит к увеличению удельных стоимостных показателей ЛЭП. Поскольку провод AC185/24 обладает схожим удельным весом, что и AC70/72, то для анализа вариантов решений по снижению потерь на корону целесообразно сравнить их остальные параметры. Потери на корону провода AC185/24 меньше в два раза,

а нагрузочные потери будут меньше почти в три раза. При этом появляется возможность для передачи большей мощности по этой линии, а стоимость сооружения линии возрастает в 1,5–2 раза.

Также на величину потерь влияет продолжительность осадков. Для получения более точных расчётов величины потерь необходимо заказывать метеорологические исследования в районе прохождения трассы ЛЭП. Чем достовернее данные, тем точнее будут расчёты, и можно будет сделать вывод о необходимости уменьшения потерь за счёт увеличения сечения провода.

Таким образом, несложно заметить, что наиболее эффективным методом является увеличение алюминиевой составляющей провода, так как это дает больше плюсов. Несомненно, это увеличивает стоимость проекта, но за счет меньших потерь отчисления на издержки будут меньше.

### **Список литературы**

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич [и др.]; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.
3. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике А.И. Долгинов. М.: Энергия, 1968. 464 с.
4. РД 34.20.172-74. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ. М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1975. 7 с.

УДК 621.316.933.6: 621.316.933.9

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПН ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Даниил Андреевич Дорохов

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

dorohov.daniil@yandex.ru

Краткий обзор ОПН различных производителей на рынке, оценка положительных и отрицательных сторон ОПН и проверка продукции одного производителя по термической стойкости при дуговых замыканиях на землю.

**Ключевые слова:** ОПН, среднее напряжение, деградация ВАХ, полимерные, керамические.



## USING THE SURGE ARRESTER FOR ARC OVERVOLTAGES LIMITING

D.A. Dorokhov

Short review of surge arresters of various companies, evaluation of positive and negative aspects of surge arresters and analysis products provided by one manufacturer, checking for thermal resistance during arc faults.

**Keywords:** surgeArrester, mediumvoltage.

Поскольку развитие технологий и промышленности шло большими темпами, разрядники начали подходить к пределу своих возможностей уже к концу 20-го века. Их громоздкость требовала тщательного обслуживания и больших затрат, начались разработки нового оборудования, защищающего сеть и элементы сети от перенапряжений любого характера. Именно из-за острой необходимости замены разрядников появились ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН).

Отечественный и западный рынок ОПН достаточно обширен, на нём представлено множество компаний, которые предлагают продукцию на весь диапазон используемых напряжений. Данный рынок представлен такими производителями, как «НПК Таврида Электрик», «ЗАО ЗЭТО», «ОАО Позитрон», «Siemens», «ABB». Западные представители имеют достаточно большую вариативность как по конструкции, так и по номинальным напряжениям ОПН, в частности компания Siemens предоставляет крайне высокий диапазон номинальных напряжений, но при этом соотношение напряжения перенапряжения к наибольшему длительно допустимому напряжению  $U/U_{\text{нр}} = 1,15$ .

В соответствии с программой импортозамещения следует рассмотреть образцы отечественных производителей. Среди вышеперечисленных компаний особенно выделяются «НПК Таврида Электрик» и «ЗАО ЗЭТО» [1, 2]. У данных компаний широкий выбор ОПН, различные варианты исполнения и широкая вариативность продукции. «ЗАО ЗЭТО» имеет ряд преимуществ, таких как: наличие ОПН на напряжение 20 кВ; большой выбор продукции на напряжения 10 и 35 кВ, с широким выбором номинальных характеристик; характеристика  $U/U_{\text{нр}} = 1,625$ , в то время как у «НПК Таврида Электрик»  $U/U_{\text{нр}} = 1,475$ .

Стоит упомянуть, что недостатки ОПН в основном распространяются на фарфоровые и керамические изделия, которых можно лишиться, применив полимерные ОПН. К общим для всех видов ОПН недостаткам можно отнести тепловое старение варисторов и деградацию вольт-амперных характеристик (ВАХ).

В таблице приведен краткий перечень достоинств и недостатков ОПН.

Таблица

Достоинства и недостатки ОПН

| Преимущества ОПН                                                                                                  | Недостатки ОПН                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Быстродействие срабатывания ОПН при коммутационных и грозовых напряжениях                                         | Взрывоопасность                                                                           |
| Безынерционное отслеживание перепадов напряжений                                                                  | Худшие тепловые характеристики фарфоровых и керамических ОПН (по сравнению с полимерными) |
| Необслуживаемость в течение долгого времени (раз в четыре года на переменном токе и раз в год на постоянном токе) | Сравнительно высокий масса-габаритный показатель                                          |
| Высокая механическая прочность и малая масса ОПН                                                                  | —                                                                                         |

Многочисленные исследования влияния воздействия импульсов различной длительности и амплитуды на изменение ВАХ варисторов показали, что основная деградация ВАХ происходит в области малых, а не больших токов. Характер деградации несимметричный, в большей степени изменению подвержена обратная ветвь ВАХ, т. е. измеренная при полярности, противоположной полярности подаваемого импульса (рис. 1).

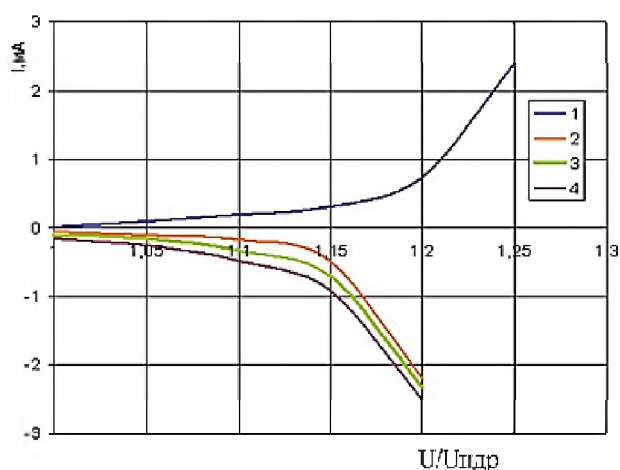


Рис. 1. Характеристики ОПН: 1 – ток утечки после импульсных воздействий, измеренный на полярности, совпадающей с полярностью импульса; 2 – ток до импульсных воздействий; 3, 4 – ток после воздействия двух и четырех импульсов, соответственно

Если принять за критерий изменения классификационное напряжение, измеренное при классификационном токе, то основное изменение ВАХ в области рабочего напряжения происходит после воздействия первых

20 импульсов. При подаче большего количества импульсов характер деградации может быть различным. Количественный анализ этого явления показал, что первоначальная деградация, составляющая менее 6 %, практически во времени не изменяется, а составляющая более 6 % при измерении через несколько суток в основном составляет более 10 %. Это явление наблюдается только при воздействии коротких импульсов (4/10, 8/20 кс). Увеличение уровня деградации ВАХ во времени при воздействии импульсов длительностью больше 500 мкс не происходит, а в некоторых случаях даже наблюдается некоторое восстановление параметров. Для всех исследуемых случаев деградации ВАХ в области больших токов не наблюдалось, то есть уровень ограничения перенапряжений остается неизменным во времени. Следует отметить, что импульсные воздействия могут привести к увеличению тока утечки.

Также причиной деградации ВАХ могут служить химические реакции материала варисторов с кислородом, выделяющимся во внутреннем пространстве ограничителя за счет частичных разрядов и возможного коронирования внутренних металлических частей с острыми краями. Но ограничители перенапряжений в полимерной изоляции не подвержены химической деградации, поскольку пространство между варисторами и крышкой ограничителя заполнено герметиком (низкомолекулярным каучуком), т. е. окислительные реакции не протекают. Однако химическая деградация не исключена для ОПН как в фарфоровой, так и в полимерной изоляции, у которых внутреннее пространство между крышкой и варисторами заполнено воздухом.

Таким образом, можно сказать, что ОПН, изготовленные из полимерных материалов, почти не подвержены деградации ВАХ, по крайней мере на низких и средних классах напряжения, именно поэтому в процессе эксплуатации ОПН до 110 кВ диагностика не требуется.

Для того чтобы обеспечить надежное и безопасное функционирование ограничителя, его способность поглощать энергию перенапряжений должна превышать ожидаемое воздействие в процессе эксплуатации.

Особо необходимо отметить вид коммутационных перенапряжений при перемежающемся характере горения заземляющей дуги при однофазных замыканиях на землю и учет энергии воздействующих на ОПН импульсов именно в этом режиме.

Как показывают расчеты, несмотря на относительно небольшую величину энергии отдельных импульсов, их количество за одно аварийное событие может достигать нескольких тысяч. При этом выделяемая энергия

неизбежно приводит к выходу из строя ОПН из-за перегрева свыше 110 °С. Решающим здесь является время существования перемежающегося режима замыкания. Это время при естественном развитии замыкания достигает 30–40 с, а при наличии релейной защиты от замыканий на землю, работающей на отключение, может составлять менее 1 с. Поэтому рассмотрим режим перемежающегося замыкания с точки зрения термической устойчивости ОПН [3].

Эквивалентное волновое сопротивление цепи разряда через ОПН при однофазном замыкании содержит:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{и}} + L_{\text{и}} \parallel L_{\text{и}} = L_{\text{и}} + \frac{L_{\text{и}}}{2} = 1,5L_{\text{и}};$$

$$C_{\Sigma} = (C_0 + C_{ac}) \parallel (C_0 + C_{bc}) = 2(C_0 + C_{ij}),$$

где  $L_{\text{и}}$  – индуктивность источника питания;  $C_0$  – емкость фазы сети относительно земли;  $C_{ij}$  – междуфазная емкость сети.

Тогда амплитуда тока через ОПН определяется как:

$$I_m = \frac{U_{\text{пер}} - U_{100}}{\sqrt{\frac{1,5L_{\text{и}}}{2(C_0 + C_{ij})}}} = \frac{\Delta U}{\sqrt{\frac{L_{\Sigma}}{C_{\Sigma}}}},$$

где  $U_{\text{пер}}$  – амплитуда неограниченных перенапряжений в узле установки ОПН;  $U_{100}$  – уровень ограничения ОПН.

Частота импульсов:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{\Sigma} C_{\Sigma}}}.$$

Длительность импульса:

$$\tau_n = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \pi \sqrt{L_{\Sigma} C_{\Sigma}}.$$

Энергия импульса при условии его приближенного представления в виде синусоиды:

$$\mathcal{E} = U_{\text{ост}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \tau_n.$$

По изложенной выше методике для распределительной сети 10 кВ были рассчитаны параметры ОПН и выбран необходимый из каталога производителя «ЗАО ЗЭТО». Для сети 10 кВ максимальное значение перенапряжения по данным [4] может составлять 28,5 кВ с вероятностью 0,05.

При мощности питающего трансформатора 10 000 кВА энергия перенапряжения, рассеиваемая в ОПН, составляет 0,93 кДж/кВ, при том что выбранный ОПН-П1/10/10,5/10/2 УХЛ имеет максимальное номинальное значение 5,6 кДж/кВ. Следовательно, ОПН данного производителя можно применять для разветвлённых сетей среднего напряжения, в частности без опасности быстрого теплового старения и выхода оборудования из строя.

Применение ОПН в сетях очень важно для нормального функционирования, но необходимо производить грамотный выбор и проверку оборудования. Для сетей средних классов напряжения определяющим при выборе ОПН может являться режим дугового замыкания на землю. Производители предоставляют прекрасную базу для использования данной технологии, что способствует увеличению надёжности сетей.

### Список литературы

1. Таврида Электрик: ОПН 3-110 кВ – Техническая информация [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tavrida.com/upload/iblock/66a/SA\\_All\\_Technical\\_Information.pdf](https://www.tavrida.com/upload/iblock/66a/SA_All_Technical_Information.pdf).
2. ЗАО ЗЭТО. Ограничители перенапряжений нелинейные [Электронный ресурс]. URL: [http://www.zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/ogranichiteli-perenapryajeniy-nelineynye](http://www.zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/ogranichiteli-perenapryajeniy-nelineynye).
3. Рыжкова Е.Н. Выбор ОПН 6-750 кВ: учеб.-метод. пособие для студентов электроэнергетических специальностей. Павлодар: Кереку, 2010. 150 с.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.

УДК 531.383

## О НУТАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЯХ ДВУХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА НА ВЫСОКОМАНЕВРЕННОМ ОБЪЕКТЕ

Елена Сергеевна Козлова

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула  
[Giroscopiya@yandex.ru](mailto:Giroscopiya@yandex.ru)

Проведен анализ линейных дифференциальных уравнений двухосного гиростабилизатора, установленного на объекте, совершающем маневры на конечные углы. В результате получена формула для определения частоты нутационных колебаний гиростабилизатора, позволяющая при разработке его конструкции оценить возможность наступления резонансных явлений.

**Ключевые слова:** конечные значения углов, высокоманевренный объект, гиростабилизатор, гиростабилизируемая платформа, нутационные колебания.

# ABOUT NUTATIONAL VIBRATIONS OF A TWO-TONE GYRO-STABILIZER IN A HIGHLY MOBILE-FACED OBJECT

E.S. Kozlova

The analysis of linear differential equations of the biaxial gyrostabilizer installed on the object performing maneuvers at finite angles is carried out. As a result, a formula for determining the frequency of the gyrostabilizer's nutation oscillations is obtained, which allows to evaluate the possibility of resonance phenomena in the design of the gyrostabilizer.

**Keywords:** finite angles, highly maneuverable object, gyrostabilization, gyrostabilizer platform, nutation oscillations.

В работах [1, 2, 4, 5] получена общая математическая модель двух-осного силового гиросtabilизатора в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & [J_{\alpha} + (J_x + 2A)\cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta] \cos \vartheta (\ddot{\epsilon} \cos \psi - \ddot{\delta} \sin \psi) - (J_x + 2A - J_y) \times \\
 & [\ddot{\psi} \sin^2 \vartheta \cos \vartheta (\epsilon \sin \psi + \delta \cos \psi) + \dot{\psi}^2 \sin^2 \vartheta \cos \vartheta (\epsilon \cos \psi - \delta \sin \psi)] - \\
 & - 2H \cos \vartheta (\dot{\epsilon} \sin \psi + \dot{\delta} \cos \psi) - H \dot{\upsilon}_1 \cos \vartheta + A \ddot{\upsilon}_2 \cos \vartheta = M_x; \\
 & A(\ddot{\upsilon}_1 + \ddot{\epsilon} \sin \psi + \ddot{\delta} \cos \psi) + H(\dot{\epsilon} \cos \psi - \dot{\delta} \sin \psi) \cos^2 \vartheta - \\
 & - (3M_1 \operatorname{tg} \vartheta + H \dot{\psi} \sin^2 \vartheta)(\epsilon \sin \psi + \delta \cos \psi) = M_1; \\
 & A \ddot{\upsilon}_1 + (J_z + 2A)(\ddot{\epsilon} \sin \psi + \ddot{\delta} \cos \psi) + H \dot{\upsilon}_2 + 2H(\dot{\epsilon} \cos \psi - \dot{\delta} \sin \psi) \cos^2 \vartheta - \\
 & - (3M_z \operatorname{tg} \vartheta + H \dot{\psi} \sin^2 \vartheta)(\epsilon \sin \psi + \delta \cos \psi) = M_z; \\
 & A[(\ddot{\upsilon}_2 + \ddot{\epsilon} \cos \psi - \ddot{\delta} \sin \psi) \cos \vartheta + \ddot{\psi}(\epsilon \sin \psi + \delta \cos \psi)] - \\
 & - H[\dot{\epsilon} \cos \vartheta \sin \psi + \dot{\delta} \cos \vartheta \cos \psi - \dot{\psi}(\cos \psi \epsilon - \sin \psi \delta) \cos \vartheta + \\
 & + \dot{\vartheta}(\sin \psi \epsilon + \cos \psi \delta) \sin \vartheta] - A \ddot{\psi} \sin \vartheta \cos \vartheta - H \dot{\psi} \sin \vartheta \cos \vartheta + M_2 \cos \vartheta,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\psi, \vartheta, \gamma$  – углы рысканья, тангажа и крена ВМО соответственно;  $\epsilon, \delta$  – углы, определяющие динамическую погрешность ГС соответственно по наружной и внутренней осям стабилизации и являются малыми;  $\upsilon_1, \upsilon_2$  – углы поворота вокруг осей прецессии;  $J_{\alpha}$  – момент инерции наружной рамки ГС относительно оси ее вращения;  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции ГСП относительно связанной с ней системы координат;  $A$  – экваториальные моменты инерции гироскопов (гироскопы идентичны и их моменты инерции относительно экваториальных осей одинаковы);  $H$  – кинетические моменты гироскопов.

При этом рассматривается случай, когда гиросtabilизатор (ГС) расположен на высокоманевренном объекте (ВМО) таким образом, что его наружная ось стабилизации совпадает с продольной осью ВМО, а гиросtabilизируемая платформа (ГСП) находится в плоскости горизонта.

Преобразуем систему уравнений (1), заменив в ней угол рыскания на угол курса ( $K = 360^\circ - \psi$ ). Тогда имеем

$$\begin{aligned}
& [J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta] \cos \vartheta (\ddot{\varepsilon} \cos K + \ddot{\delta} \sin K) - (J_x + 2A - J_y) \times \\
& [\ddot{\psi} \sin^2 \vartheta \cos \vartheta (-\varepsilon \sin K + \delta \cos K) + \dot{\psi}^2 \sin^2 \vartheta \cos \vartheta (\varepsilon \cos K + \delta \sin K)] - \\
& - 2H \cos \vartheta (-\dot{\varepsilon} \sin K + \dot{\delta} \cos K) - H \dot{\nu}_1 \cos \vartheta + A \ddot{\nu}_2 \cos \vartheta = M_x; \\
& A(\ddot{\nu}_1 - \ddot{\varepsilon} \sin K + \ddot{\delta} \cos K) + H(\dot{\varepsilon} \cos K + \dot{\delta} \sin K) \cos^2 \vartheta - \\
& - (3M_1 \operatorname{tg} \vartheta + H \dot{\psi} \sin^2 \vartheta)(-\varepsilon \sin K + \delta \cos K) = M_1; \\
& A \ddot{\nu}_1 + (J_z + 2A)(-\ddot{\varepsilon} \sin K + \ddot{\delta} \cos K) + H \dot{\nu}_2 + 2H(\dot{\varepsilon} \cos K + \dot{\delta} \sin K) \cos^2 \vartheta - \\
& - (3M_z \operatorname{tg} \vartheta + H \dot{\psi} \sin^2 \vartheta)(-\varepsilon \sin K + \delta \cos K) = M_z; \\
& A[(\ddot{\nu}_2 + \ddot{\varepsilon} \cos K + \ddot{\delta} \sin K) \cos \vartheta + \ddot{\psi}(-\varepsilon \sin K + \delta \cos K)] - \\
& - H[-\dot{\varepsilon} \cos \vartheta \sin K + \dot{\delta} \cos \vartheta \cos K - \dot{\psi}(\cos K \varepsilon + \sin K \delta) \cos \vartheta + \\
& + \dot{\vartheta}(-\sin K \varepsilon + \cos K \delta) \sin \vartheta] - A \ddot{\psi} \sin \vartheta \cos \vartheta - H \dot{\psi} \sin \vartheta \cos \vartheta + M_2 \cos \vartheta.
\end{aligned}$$

Для оценки частоты нутационных колебаний рассмотрим частный случай, когда углы отклонения ВМО постоянны и внешние воздействия отсутствуют.

Тогда исходная система уравнений запишется в виде:

$$\begin{aligned}
& [J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta] \cos \vartheta (\ddot{\varepsilon} \cos K + \ddot{\delta} \sin K) - \\
& - 2H \cos \vartheta (-\dot{\varepsilon} \sin K + \dot{\delta} \cos K) - H \dot{\nu}_1 \cos \vartheta + A \ddot{\nu}_2 \cos \vartheta = 0; \\
& A(\ddot{\nu}_1 - \ddot{\varepsilon} \sin K + \ddot{\delta} \cos K) + H(\dot{\varepsilon} \cos K + \dot{\delta} \sin K) \cos^2 \vartheta = 0; \\
& A \ddot{\nu}_1 + (J_z + 2A)(-\ddot{\varepsilon} \sin K + \ddot{\delta} \cos K) + H \dot{\nu}_2 + 2H(\dot{\varepsilon} \cos K + \dot{\delta} \sin K) \cos^2 \vartheta = 0; \\
& A(\ddot{\nu}_2 + \ddot{\varepsilon} \cos K + \ddot{\delta} \sin K) \cos \vartheta - H(-\dot{\varepsilon} \cos \vartheta \sin K + \dot{\delta} \cos \vartheta \cos K) = 0.
\end{aligned}$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся преобразованием Лапласа. Для нулевых начальных условий эта система уравнений приводится к следующему виду:

$$\begin{aligned}
& (A_1 \cos Ks + 2H \sin K) \cos \vartheta s \varepsilon(s) + (A_1 \sin Ks - 2H \cos K) \cos \vartheta s \delta(s) - \\
& - H \cos \vartheta s \nu_1(s) + A \cos \vartheta s^2 \nu_2(s) = 0; \\
& (-A \sin Ks + H \cos K \cos^2 \vartheta) s \varepsilon(s) + \\
& + (A \cos Ks + H \sin K \cos^2 \vartheta) s \delta(s) + s^2 \nu_1(s) = 0; \\
& (-A_2 \sin Ks + 2H \cos K \cos^2 \vartheta) s \varepsilon(s) + \\
& + (A \cos Ks + 2H \sin K \cos^2 \vartheta) s \delta(s) + A s^2 \nu_1(s) + H s \nu_2(s) = 0; \\
& (A \cos Ks + H \sin K) \cos \vartheta s \varepsilon(s) + \\
& + (A \sin K - H \cos K) \cos \vartheta s \delta(s) + A s^2 \nu_2(s) = 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

где  $A_1 = J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta$ ;  $A_2 = J_z + 2A$ .

Для упрощения следующих преобразований дополнительно введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= (A_1 \cos Ks + 2H \sin K) \cos \vartheta; & a_{21} &= (-A \sin Ks + H \cos K \cos^2 \vartheta)s; \\
 a_{12} &= (A_1 \sin Ks - 2H \cos K) \cos \vartheta; & a_{22} &= (A \cos Ks + H \sin K \cos^2 \vartheta)s; \\
 a_{13} &= -H \cos \vartheta s; & a_{23} &= As^2; \\
 a_{14} &= A \cos \vartheta s^2; & a_{24} &= 0; \\
 \\ 
 a_{31} &= (-A_2 \sin Ks + 2H \cos K \cos^2 \vartheta)s; & a_{41} &= (A \cos Ks + H \sin K) \cos \vartheta s; \\
 a_{32} &= (A \cos Ks + 2H \sin K \cos^2 \vartheta)s; & a_{42} &= (A \sin K - H \cos K) \cos \vartheta s; \\
 a_{33} &= As^2; & a_{43} &= 0; \\
 a_{34} &= Hs; & a_{44} &= As^2.
 \end{aligned}$$

Частота нутации определяется корнями характеристического уравнения  $\Delta(s) = 0$ .

Здесь  $\Delta(s)$  – характеристический многочлен системы уравнений (2), который с учетом обозначений (3) может быть представлен как

$$\Delta(s) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}.$$

После преобразований характеристическое уравнение принимает вид биквадратного уравнения:

$$\begin{aligned}
 \Delta(s) &= A^2 \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right] s^4 + \\
 &+ AH^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta) s^2 + H^4 \cos^4 \vartheta = 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Из рассмотрения уравнения (4) следует, что частота нутационных колебаний ГС не зависит от значения курса  $K$ .

Введем новую переменную  $x = s^2$ . Тогда корни квадратного уравнения

$$\begin{aligned}
 &A^2 \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right] x^2 + \\
 &+ AH^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta) x + H^4 \cos^4 \vartheta = 0
 \end{aligned}$$

определяются в виде:



$$x_{1,2} = - \left[ \frac{H^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta)}{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right]^{\pm} \left\{ \left[ \frac{H^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta)}{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right]^2 - \frac{H^4 \cos^4 \vartheta}{A^2 \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Используя выражение бинома Ньютона [3], после преобразований получим

$$x_{1,2} = - \left[ \frac{H^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta)}{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right] \times \left[ 1 \mp \left( 1 - \frac{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]}{A(A_1 + A_2 \cos \vartheta)^2} \right) \right].$$

Отсюда

$$x_1 = - \frac{H^2 \cos^2 \vartheta}{A(A_1 + A_2 \cos \vartheta)};$$

$$x_2 = - \left[ \frac{H^2 \cos^2 \vartheta (A_1 + A_2 \cos \vartheta)}{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right] \times \left[ 2 - \frac{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]}{A(A_1 + A_2 \cos \vartheta)^2} \right].$$

Возвращаясь к исходной переменной, имеем

$$s_{1,2} = \pm \frac{jH \cos \vartheta}{\sqrt{A(J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta + A_2 \cos \vartheta)}};$$

$$s_{3,4} = \pm jH \cos \vartheta \left\{ \left[ \frac{(A_1 + A_2 \cos \vartheta)}{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \left\{ \left[ 2 - \frac{2A \left[ A(A + A_2) \cos^2 \vartheta - A_1(A - A_2) \cos \vartheta \right]}{A(A_1 + A_2 \cos \vartheta)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае ГС совершает нутационные колебания с двумя частотами, значения которых с учетом вышепринятых обозначений соответственно равны:

$$n_1 = \frac{H \cos \vartheta}{\sqrt{J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta + (J_z + 2A) \cos \vartheta}}; \\ n_2 = H \cos \vartheta \left\{ \left[ \frac{J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta + (J_z + 2A) \cos \vartheta}{2A \left[ A(J_z + 3A) \cos^2 \vartheta - (J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta) (J_z + A) \cos \vartheta \right]} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \left\{ \left[ 2 - \frac{2A \left[ A(J_z + 3A) \cos^2 \vartheta - (J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta) (J_z + A) \cos \vartheta \right]}{A(J_\alpha + (J_x + 2A) \cos^2 \vartheta + J_y \sin^2 \vartheta + (J_z + 2A) \cos \vartheta)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Формулы (5) позволяют оценить возможность наступления резонансных явлений при воздействии на ГС вибрационных нагрузок.

### Список литературы

1. Козлова Е.С., Рогов С.В. Общая математическая модель двухосного силового гиросtabilизатора // Системы управления электротехническими объектами: сб. тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф (СУЭТО-8). Тула, 2018. Вып. 8. 195 с.
2. Козлова Е.С., Рогов С.В. О погрешности выходных сигналов датчика крена и дифферента при качке судна // Системы управления электротехническими объектами: сб. науч. тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. Тула, 2015. Вып. 7. 190 с.
3. Козлова Е.С., Власенков В.М., Рогов С.В. Аналитическая механика и теория колебаний. Ч. 1. Механика Лагранжа–Гамильтона: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 62 с.

4. Козлова Е.С. Математическая модель волчка Лагранжа при контакте с поверхностью // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. / под общ. ред. А.А. Большакова. Саратов, 2015. Т. 7. 124–127 с.

5. Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин: монография / Е.С. Козлова [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.

УДК: 621.311.1.018.3

## **КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ**

Владимир Николаевич Костин<sup>1</sup>, Владимир Александрович Сериков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>СПГУ, г. Санкт-Петербург

<sup>1</sup>kostin\_vn@mail.ru, <sup>2</sup>serikov.va@bk.ru

В программном комплексе Multisim выполнено исследование режимов работы системы электроснабжения 6–10/0,4 кВ, включающей линейную и нелинейную (выпрямитель) нагрузки и конденсаторную батарею на стороне низшего напряжения. Оценено влияние нелинейной нагрузки на качество напряжения питающей сети в зависимости от соотношения мощностей линейной и нелинейной нагрузок. Показано, что в резонансных и близких к ним режимах качество напряжения не соответствует нормам.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, конденсаторные батареи, компенсация реактивной мощности, показатели качества электроэнергии, резонансные явления, коэффициент несинусоидальности напряжения.

## **QUALITY OF POWER SUPPLY VOLTAGE IN ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEMS WITH NONLINEAR LOAD**

V.N. Kostin, V.A. Serikov

In the Multisim software package, a study was performed on the operating modes of power supply system: 6–10/0.4 kV, with linear and non-linear (rectifier) loads and a capacitor battery on the low-voltage side. The effect of non-linear load on the quality of the supply voltage is estimated depending on the power ratio of linear and non-linear loads. It is shown that in resonance and near resonance modes, the quality of the voltage does not correspond to the norms.

**Keywords:** higher harmonics, capacitor batteries, compensation of reactive power, power quality indicators, resonant phenomena, voltage non-sinusoid ratio.

Практика работы промышленных предприятий [1, 4], а в настоящее время и крупных административных зданий, офисов и бизнес-центров [2], показывает, что сети электроснабжения напряжением 0,4 кВ насыщены

высшими гармониками вследствие широкого использования в промышленности и городских электрических сетях низкого напряжения полупроводниковых преобразователей. Высшие гармоники тока негативно влияют на работу всего электрооборудования системы электроснабжения, вызывают дополнительные потери мощности и напряжения в распределительной сети, понижающих трансформаторах и электрических машинах, токовую перегрузку батарей конденсаторов, применяемых для компенсации реактивной мощности.

Цель исследований – на базе компьютерного моделирования оценить негативное воздействие гармонических токов на качество напряжения питающей сети в трёхфазной системе электроснабжения. Исследование режима такой системы выполнялось в программном комплексе Multisim для типового ряда мощностей трансформаторов 6–10/0,4 кВ (250, 400, ... 2500 кВ·А).

Трёхфазная расчетная схема системы приведена на рис. 1. В схеме трансформатор моделировался тремя фазными напряжениями  $U_{\phi}$  и активным сопротивлением и индуктивностью  $R_T L_T$ , линейная нагрузка – активным сопротивлением и индуктивностью  $R_H L_H$ , нелинейная нагрузка – мостовым диодным выпрямителем  $D1-D6$  с сопротивлением нагрузки  $R_d$  и сглаживающим дросселем  $L_d$ , конденсаторная батарея – емкостями  $C_K$ .

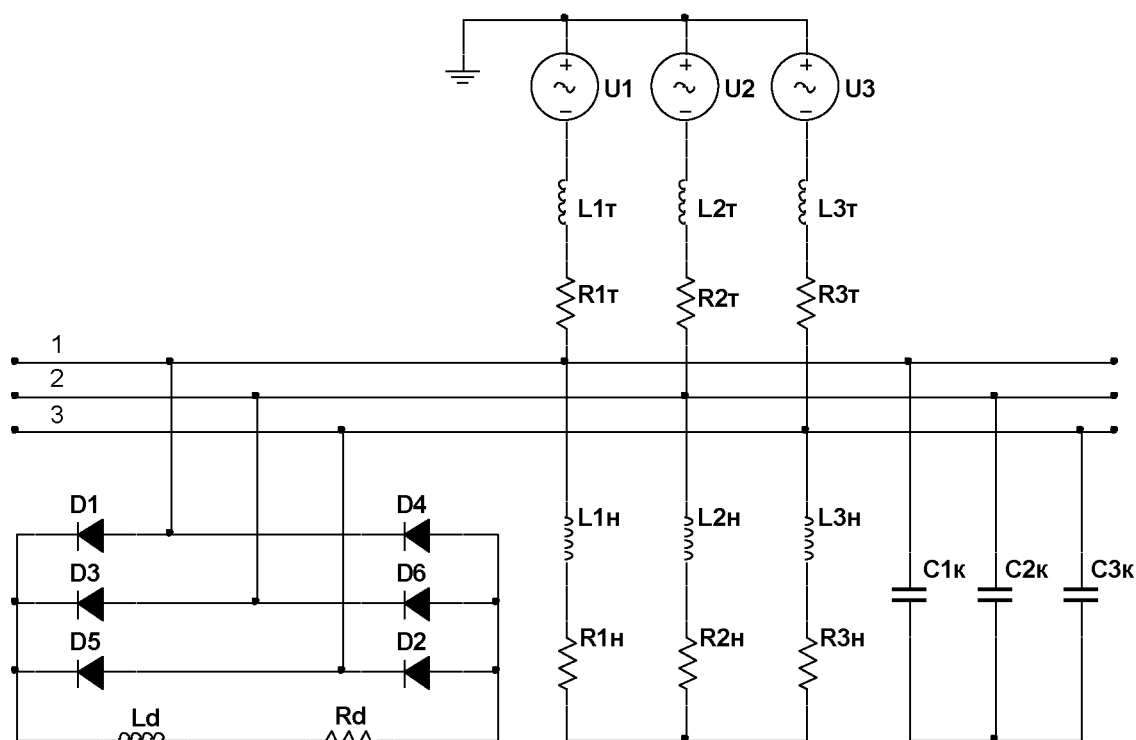


Рис. 1. Трёхфазная (а) и однофазная (б) модели схемы электроснабжения в Multisim

Для рассматриваемого ряда мощностей трансформаторов результаты моделирования качественно не отличались.

Результаты моделирования приводятся для трансформатора номинальной мощности  $S_{T \text{ ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , а все регулируемые мощности даются в относительных единицах по отношению к номинальной мощности трансформатора:

- мощность на стороне нелинейной нагрузки  $P_d^* = P_d / S_{T \text{ ном}}$ ;
- мощность линейной нагрузки  $S_H^* = S_H / S_{T \text{ ном}}$ ;
- мощность конденсаторной батареи  $Q_H^* = Q_H / S_{T \text{ ном}}$ .

Оценка влияния нелинейной нагрузки на качество напряжения питающей сети выполнялась по трехфазной схеме (рис. 1) при загрузке трансформатора от 0 до  $S_{T \text{ ном}}$  нелинейной нагрузкой (сопротивление  $R_d$ ) и линейной нагрузкой (параметры  $R_H L_H$ ) и отключенной конденсаторной батареей  $C_K$ . Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  автоматически определялся программой Multisim методом разложения в ряд Фурье кривой фазного напряжения на выходе трансформатора.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 значения  $K_U$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 8 % в течение 95% времени интервала в одну неделю и 12 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования

|                               |       |      |      |      |      |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|
| $P_d^*$                       | 1     | 0,75 | 0,66 | 0,5  | 0,25 |
| $S_H^*$                       | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    |
| $K_U, \%$                     | 10,25 | 9,1  | 7,15 | 6,3  | 3,6  |
| $P_d^*$                       | 1     | 0,75 | 0,66 | 0,5  | 0,25 |
| $S_H^* (\cos \varphi = 0,85)$ | 0     | 0,25 | 0,33 | 0,5  | 0,75 |
| $K_U, \%$                     | 10,25 | 9,2  | 7,65 | 6,75 | 3,95 |

В верхней части табл. 1 приведены значения коэффициента  $K_U$  при загрузке трансформатора только нелинейной нагрузкой.

В нижней части табл. 1 приведены значения  $K_U$  при полной загрузке трансформатора нелинейной и линейной нагрузками. Соотношение этих нагрузок изменялось. Видно некоторое увеличение коэффициента  $K_U$  при введении линейной нагрузки, что, по-видимому, объясняется некоторым уменьшением первой гармоники напряжения при увеличении нагрузки трансформатора.

Следовательно, для верхней и нижней частей табл. 1 требования к качеству напряжения выполняются при величине нелинейной нагрузки, не превышающей 70 %.

В городских и промышленных сетях широко применяются батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности. При определенных значениях мощностей конденсаторных батарей в сети возникают резонансные явления на частотах высших гармоник тока вентильной нагрузки [3]. Для рассматриваемой системы электроснабжения рассчитаны мощности конденсаторных батарей, при которых возникает резонансный режим для канонических гармоник  $n = 6k \pm 1$ .

Таблица 2

Мощности конденсаторных батарей, при которых возникает резонанс

| $S_{\text{ТНОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$ | $U_{\text{к}}, \%$ | $n$              | 5    | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 250 и 400                                 | 4,5                | $Q_{\text{к}}^*$ | 0,89 | 0,45 | 0,18 | 0,13 | 0,08 | 0,06 |
| 630 и 1000                                | 5,5                |                  | 0,73 | 0,37 | 0,15 | 0,11 | 0,06 | 0,05 |
| 1600 и 2500                               | 6,0                |                  | 0,67 | 0,34 | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,05 |

Установлено, что в режимах, близких к резонансному, заметно ухудшается качество напряжения питающей сети. В табл. 3 приведены значения коэффициента  $K_U$ , % в зависимости от соотношения  $P_d^*/S_{\text{н}}^*$  при загрузке трансформатора на  $0,75S_{\text{ТНОМ}}$  при межрезонансном и резонансном режиме работы системы электроснабжения на нелинейную нагрузку.

Таблица 3

Значения коэффициента  $K_U$ , % в зависимости от соотношения  $P_d^*/S_{\text{н}}^*$

|                        |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $P_d^*$                | 0,5  | 0,45 | 0,37 | 0,3  | 0,25 | 0,15 | 0,1  |
| $P_d^*/S_{\text{н}}^*$ | 2    | 1,5  | 1    | 0,75 | 0,5  | 0,25 | 0,15 |
| Межрезонансный режим   |      |      |      |      |      |      |      |
| $K_U, \%$              | 10,8 | 8    | 7,3  | 6,3  | 5,2  | 3,1  | 1,9  |
| Резонансный режим      |      |      |      |      |      |      |      |
| $K_{U7}, \%$           | –    | –    | 15,8 | 15,6 | 15,1 | 12   | 7,9  |
| $K_{U11}, \%$          | 16   | 15,1 | 14,8 | 14,6 | 13,4 | 11,1 | 7,6  |
| $K_{U13}, \%$          | 15,2 | 14,3 | 13,1 | 12,9 | 12   | 9,6  | 6,3  |

Следовательно, в резонансных и близких к ним режимах требования ГОСТ к качеству напряжения не выполняются.

Результаты моделирования показали, что при значениях  $Q_k^* < 0,1$  практически не удается уйти от резонансных явлений на частотах 13-й гармоники и выше. Такая ситуация может сложиться при выборе ступенчато регулируемых конденсаторных батарей и отключении части ступеней батареи из-за уменьшения линейной нагрузки.

В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость суммарного коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_U$ , %, от мощности батарей конденсаторов  $Q_k^* = 0,03 \div 0,1$  и от соотношения мощностей  $P_d^*/S_H^*$ . Пунктирными линиями и точками ( $P_d^* = 0,24$ ;  $S_H^* = 0,22$ ;  $\cos\varphi = 0,85$ ) показана зависимость, при которой величина коэффициента  $K_U$ , %, на всем диапазоне регулирования  $Q_k^*$  выше допустимых значений ( $K_U > 8$  %). При уменьшении нелинейной нагрузки  $P_d^*$  коэффициент  $K_U$ , также снижается. Такой режим показан на графике непрерывной линией ( $P_d^* = 0,15$ ;  $S_H^* = 0,22$ ;  $\cos\varphi = 0,85$ ). При значении  $P_d^* = 0,06$  ( $P_d^*/S_H^* = 0,2$ ) на всем диапазоне  $Q_k^*$  коэффициент  $K_U$ , %, соответствует допустимому.

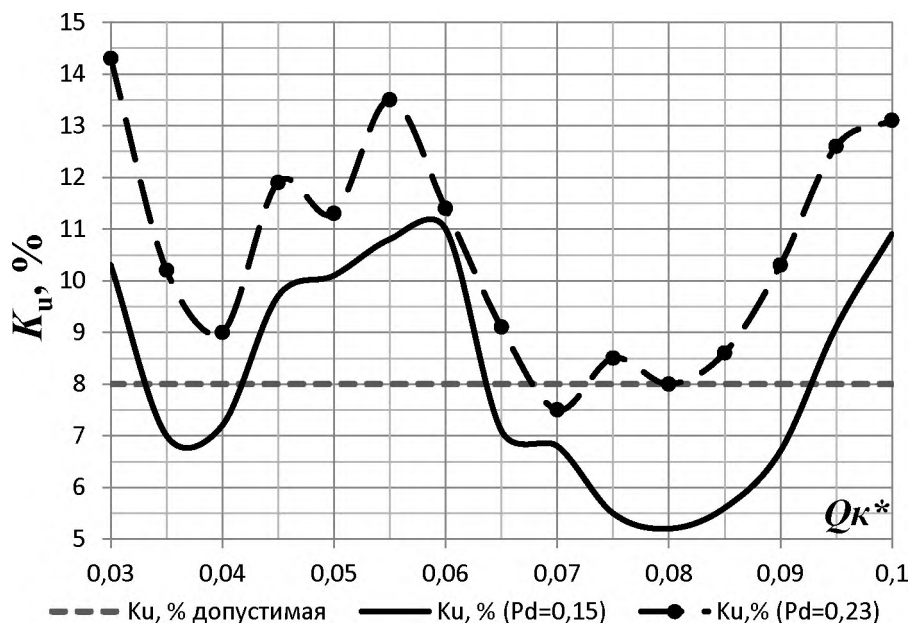


Рис. 2. Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения питающей сети от мощности БК  $Q_k^*$  и соотношения  $P_d^*/S_H^*$

На основе компьютерного моделирования в программном комплексе Multisim оценено негативное воздействие гармонических токов на качество напряжения питающей сети. Показано, что в режимах резонанса и близких

к нему качество напряжения заметно ухудшается и не соответствует требованиям ГОСТ при отношении мощностей  $P_d^*/S_H^* > 0,2$ . Возникновение такой ситуации наиболее вероятно при снижении значения линейной нагрузки, например в ночное время, и при значениях  $Q_K^* < 0,1$ .

### Список литературы

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
2. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С.А. Темербаев [и др.] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2013. № 6. С. 107–120.
3. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Вопросы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник на коксохимическом производстве // Кокс и химия. 2016. № 4. С. 44–49.
4. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 1. С. 69–71.

УДК 621.3

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ НАГРУЗКИ НА ГЕНЕРАТОРНОМ НАПРЯЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Александр Павлович Соколов<sup>1</sup>, Ольга Викторовна Газизова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск  
1sasha777sokolov@list.ru, <sup>2</sup>logan\_b\_7@mail.ru

Одной из основных тенденций промышленной электроэнергетики в наши дни является повышение доли собственных источников электрической энергии промышленных предприятий. Это усложняет как конфигурацию электрической сети, так и возможные эксплуатационные режимы работы. Одной из задач ведения подобных режимов является распределение реактивных нагрузок на генераторном напряжении между параллельно работающими машинами с учетом действия автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и характеристик питающей сети. Разработан алгоритм и программный комплекс определения параметров синхронных генераторов при изменении реактивных нагрузок генераторного напряжения с учетом действия регуляторов возбуждения. Программный комплекс позволяет прогнозировать подобные режимы с целью исключения перегрузки синхронных машин.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, реактивная нагрузка, регулирование возбуждения, промышленная электростанция, устойчивость, распределение мощностей.



# DISTRIBUTION OF REACTIVE POWER OF LOADING ON GENERATOR VOLTAGE OF INDUSTRIAL ELECTRIC POWER PLANTS

A.P. Sokolov, O.V. Gazizova

Abstract of the main trend of the industrial power industry today is to increase the share of own sources of electrical energy of industrial enterprises. This complicates both the electrical network configuration and the possible operational modes of operation. The task of maintaining such modes is the distribution of reactive loads on the generator voltage between parallel machines, taking into account the action of automatic control of excitation and characteristics of the supply network. The algorithm and software complex for determining the parameters of synchronous generators when changing the reactive loads of the generator voltage, taking into account the action of excitation controllers, has been developed. The software package allows you to predict such modes in order to avoid overloading synchronous machines.

**Keywords:** synchronous generator, reactive load, excitation control, industrial power plant, stability, power distribution.

В настоящее время на промышленных предприятиях в качестве источников электрической энергии существенно возрастает доля объектов распределенной генерации. К ним относятся газопоршневые, парогазовые, газотурбинные электростанции, а также мини-ТЭЦ. Как правило, данные источники энергии размещаются в непосредственной электрической близости от нагрузок [1–4]. Выдаваемая данными установками активная и реактивная мощность зависит от их типа, условий работы и законов регулирования мощностей.

Как правило, такие установки являются маломощными, что должны учитывать выбранные законы регулирования [5–7]. Как правило, регуляторы скорости работают на постоянство выработки активной мощности, т. е. по электрическому графику. В этом случае можно четко прогнозировать вырабатываемую мощность. В случае, если генератор работает только на вторичных энергоресурсах или по тепловому графику, вырабатываемая активная мощность будет изменяться, что усложняет анализ режимов. Регуляторы возбуждения на таких электростанциях, как правило, имеют сложный закон регулирования, учитывающий поддержание напряжения на выводах обмотки статора в весьма незначительных пределах, что обусловлено большим влиянием системы. При существенном снижении напряжения со стороны энергосистемы генератор начинает вырабатывать большую реактивную мощность, что может вызвать перегруз обеих обмоток. В случае невозможности выполнения данного закона регулирования регулятор с учетом нагрузочной диаграммы снижает ток возбуждения

до тех пор, пока не войдем в зону допустимых реактивных мощностей с учетом нужной выработки активной мощности. При этом напряжение обмотки статора генератора снизится по отношению к напряжению уставки. В таких условиях ЭДС генераторов все равно остаются большими по сравнению с уровнем напряжения относительно питающей энергосистемы [8–10].

В процессе эксплуатации реактивные нагрузки, работающие на генераторном напряжении, начинают возрастать и естественным образом загружать собственные генераторы. При этом снова возрастают реактивные токи, перегревая обмотки генератора. Чтобы снова войти в допустимую область диаграммы мощности, регулятор снижает ток возбуждения. При этом уровень напряжения снова снижается, что может вызвать нарушение устойчивости. В ряде случаев персонал вынужден снижать ток возбуждения вручную.

Таким образом, возникает задача распределения реактивных мощностей в узлах, имеющих источники распределенной генерации, с целью прогнозирования эксплуатационных установившихся режимов в промышленных электрических сетях [11–15]. Одним из способов поддержания параметров режима является изменение уставки напряжения, что обеспечивает более корректную и надежную работу автоматики.

С целью анализа подобных режимов разработан алгоритм, позволяющий определить загрузку генераторов по реактивной мощности при изменении нагрузки на генераторном напряжении и работе АРВ по закону постоянства напряжения. Алгоритм, показанный на рис. 1, положен в основу программного комплекса «КАТРАН» [8–11].

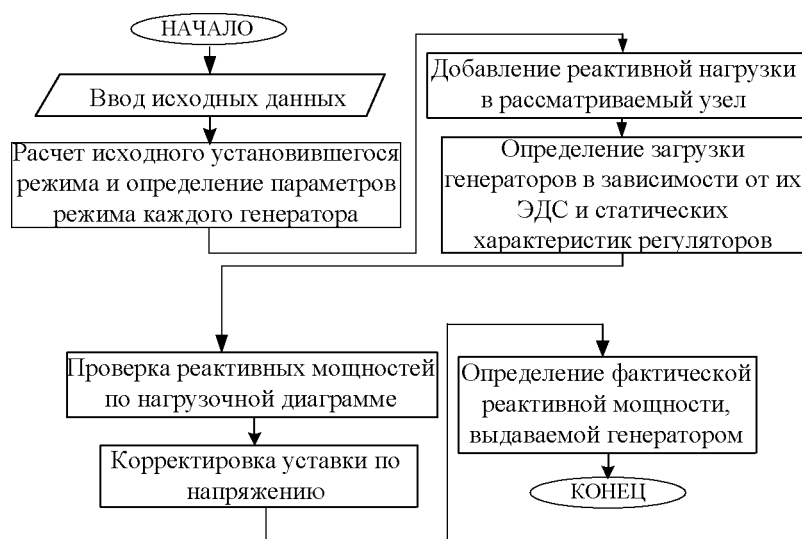


Рис. 1. Алгоритм определения реактивной мощности генератора при изменении реактивной нагрузки

Программный комплекс позволяет рассчитать подобные режимы и разработать мероприятия по изменению напряжения уставки собственных источников электрической энергии. Это позволит избежать перегрузки оборудования и повысить устойчивость и надежность работы генераторов.

Разработанный алгоритм и программный комплекс позволяют определять напряжение уставки и выдаваемую реактивную мощность генератора при изменении реактивной нагрузки, работающей на генераторном напряжении источников распределенной генерации. Это позволит прогнозировать подобные режимы работы и обеспечивать устойчивую работу генератора даже при существенном снижении напряжения со стороны питающей энергосистемы. При этом с целью обеспечения устойчивости может быть учтена возможность снижения выдаваемой генераторами активной мощности воздействием на подачу первичного энергоносителя.

### **Список литературы**

1. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регуляторной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2015. С. 8–10.

2. Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4(33). С. 29–34.

3. Малафеев А.В., Игуменцев В.А., Хламова А.В. Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций с целью оптимизации режима системы электроснабжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. № 4. С. 34–38.

4. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17–22.

5. Веников В.А. Сильное регулирование возбуждения. М.: Госэнергоиздат, 1963. 152 с.

6. Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н. Исследование влияния автоматических регуляторов промышленных генераторов на параметры переходных процессов коротких замыканий и выхода на раздельную работу // Главный энергетик. 2011. № 3. С. 26–29.

7. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.

8. Газизова О.В., Кондрашов Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 3(32). С. 27–38.

9. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашов Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. 2016. Т. 16. № 4. С. 12–22. (Сер. «Энергетика»).

10. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // Вестник Южно-Уральск. гос. ун-та. 2008. № 17(117). С. 72–74. (Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»).

11. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // Proceedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 759–763.

12. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электро-энергетических систем. М.: Госэнергоиздат, 1963. 152 с.

13. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / О.В. Буланова [и др.] // Электрика. 2010. № 8. С. 24–26.

14. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 40–47.

15. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 57(2017) 012059.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ ОХРАННЫХ ЗОН ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Александр Иванович Рудаков<sup>1</sup>, Роман Радионович Спиридонов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>rud-38@mail.ru, <sup>2</sup>roma-62@bk.ru

Линейные объекты – это протяженные объекты, длина которых во много раз превосходит другие размерные характеристики. К таким объектам относят железные и автомобильные дороги, трубопроводы, линии электропередач. Линейным объектам необходима защита и охрана с целью их нормальной эксплуатации и предотвращения аварий. Для этого устанавливаются охранные зоны, размер и режим использования которых зависит от вида объекта и класса его опасности.

**Ключевые слова:** линейный объект, охранный зона, кадастровый учет, правовой режим, зоны с особым режимом использования территорий.

## USE OF TERRITORIES OF THE REGULATED SECURITY ZONES OF ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

R.R. Spiridonov, A.I. Rudakov

Linear objects are extended objects that are many times longer than other dimensional characteristics. These are railways and highways, pipelines, power lines. Linear objects need protection and security in order to ensure their normal operation and prevent accidents. For this reason security zones are established the size and mode of use of which depends on the type of object and its hazard class.

**Keywords:** linear object, secured territory, cadastral registration, legal regime, zones with a special mode of use of territories.

Сегодня, как никогда, сетевые организации проводят активную работу по установлению границ охранных зон в отношении линейных объектов капитального строительства (ЛЭП, ВОЛС, газопроводы, магистральные нефтепроводы и др.).

Поэтому вступивший в силу с 1 января 2016 г. Федеральный Закон №252-ФЗ «О внесении изменений в Земельный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации», исключивший охранные зоны из объектов землеустройства, затруднил процедуру внесения сведений в государственный кадастр недвижимости о границах охранных зон линейных объектов капитального строительства.

### Установление границ охранных зон линий электропередач

Границы охранных зон регламентируются для линий электропередачи в зависимости от их напряжения. В таких зонах недопустимо осуществлять любую деятельность, способную нарушить нормальную работу объектов

электросетевого хозяйства, включая повреждение и выход из строя оборудования, причинение вреда здоровью граждан, их имуществу, имуществу юридических лиц, экологический ущерб.

Необходимая ширина просек, минимально допустимых расстояний до автомобильных, железных дорог, иных коммуникаций регламентируется ПУЭ [1].

В связи с тем, что помимо ПУЭ существует ряд нормативных документов, регламентирующих охранные зоны линий электропередач, фактические размеры особых территорий отличаются. Одним из таких является Постановление от 24 февраля 2009 г. № 160 «О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон». Требования, предусмотренные подпунктом «а» настоящего документа (примечание введено Постановлением Правительства РФ от 26 августа 2013 г. № 736), в несколько раз превышают значения, приведенные в п. 2.5.207 ПУЭ. Например, для линий напряжением 110кВ по ПУЭ минимальная величина составляет 4 м, а по Постановлению №160 – 20 м.

По ПУЭ при прокладке кабельных линий в зоне насаждений расстояние от кабелей до стволов деревьев должно быть не менее 2 м. Однако, по постановлению №160 подпункт «а», зона вдоль подземных кабельных линий электропередачи ограничена параллельными вертикальными плоскостями, отстоящими по обе стороны линии электропередачи от крайних кабелей на расстоянии 1 м [2].

### **Возможность использования территорий, входящих в охрannую зону линейных объектов**

Охранные зоны воздушных линий электропередач больше зон кабельных линий тех же напряжений. В случае замены воздушных линий кабельными освободится значительная территория, которая может использоваться для различных видов деятельности, способных принести дополнительный доход в госбюджет. Ставки платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности, при осуществлении какой-либо деятельности закреплены в Постановлении Правительства РФ от 22 мая 2007 г. № 310 (ред. от 23 февраля 2018 г.) [2].

Необходимо отметить, что при аренде лесного участка для линейных объектов осуществляется лишь один вид деятельности. Ставка платы (рублей за гектар в год) для основных и неосновных древесных пород лесных насаждений по Республике Татарстан составляет: хвойные – 3 526,72; твердолиственные – 4746,52; мягколиственные – 3165,06.

Для максимальной полезности на одной территории возможно осуществлять несколько видов деятельности, например:

1. Выращивание посадочного материала лесных растений (саженцев, сеянцев) (введены Постановлением Правительства РФ от 3 февраля 2014 г. № 74):

| Субъекты Российской Федерации | Ставка платы, рублей за гектар в год |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Республика Татарстан          | 4390                                 |

2. Выращивание лесных плодовых, ягодных, декоративных и лекарственных растений:

| Субъекты Российской Федерации | Ставка платы, рублей за гектар в год |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Республика Татарстан          | 32,1                                 |

Однако не стоит забывать о реализации деревьев в виде саженцев для продажи, качественной древесины, твердого топлива. Освобождение территорий позволит увеличить объемы лесозаготовок.

### **Влияние линейных объектов на экологию**

Вырубка лесов приводит к сокращению многообразия флоры и фауны, вызывает эрозию почвы.

Независимо от охранной зоны линейного объекта, при его строительстве вырубается полоса шириной 4 м для прохождения строительной техники.

Строительство крупных объектов приводит к большим миграциям животных.

Растения, располагающиеся вблизи линий электропередач, подвержены мутациям. Например, нередко случаи произрастания елей вдоль ЛЭП с 2 вершинами.

Строительство крупных объектов приводит к смещениям пластов и нарушению течения подземных вод. Примером может служить смещение пластов на границе Республики Марий Эл и Республики Татарстан (Зеленодольский район). Нарушение циркуляции грунтовых вод привело к тому, что в Марий Эл наблюдается заболачивание, в то время как в Зеленодольском районе – иссушение.

Необходимость создания проходов и подъездов для доступа к объектам электросетевого хозяйства приводит к дополнительным потерям лесного хозяйства.

### **Особенности эксплуатации воздушных и кабельных линий**

1. Поддержание охранных зон в надлежащем состоянии является обязанностью энергетической компании, арендующей территорию:

- прокладка и содержание просек вдоль воздушных линий электропередачи и по периметру подстанций и распределительных устройств в случае, если указанные зоны расположены в лесных массивах и зеленых насаждениях;

- вырубка и опиловка деревьев и кустарников в пределах минимально допустимых расстояний до их крон, а также вырубка деревьев, угрожающих падением;

- содержание просеки в пожаробезопасном состоянии в соответствии с требованиями правил пожарной безопасности в лесах;

- поддержание ширины просек в размерах, предусмотренных проектами строительства объектов электросетевого хозяйства и требованиями, определяемыми в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, путем вырубки, обрезки крон деревьев (кустарников) и иными способами;

- вырубку или обрезку лесных насаждений, произрастающих на просеках, высота которых превышает 4 м.

2. Энергетические компании арендуют лишь ту площадь, на которой располагаются опоры и линии электропередач, однако окружающая их охранный зона не может использоваться лесничеством.

3. В зимний период линии необходимо очищать от наледи, чтобы предупредить обрыв проводов. В зимний период в силу метеоусловий необходимы дополнительные затраты на то, чтобы добраться до воздушных линий электропередач.

4. В силу того, что все леса в Республике Татарстан делятся на сектора, между ними существуют просеки (шириной 7 м). Данные пролески можно использовать для прокладки кабельных линий, тем самым избегая необходимости вырубать часть леса.

5. Воздушные линии необходимо периодически осматривать на предмет кражи электроэнергии путем накидывания линий на воздушные ЛЭП.

### **Заключение**

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что кабельные линии являются наиболее оптимальным решением для передачи электроэнергии, потому что:

1. Охранный зона кабельных линий гораздо меньше, чем воздушных, что позволяет использовать неэксплуатируемые территории для иных видов деятельности.

2. Влияние кабельных линий на флору и фауну меньше, чем воздушных ЛЭП.



3. Низкая вероятность смещения пластов и нарушения циркуляции грунтовых вод.

4. Кабельные линии различного напряжения возможно использовать на посевных площадях.

5. При возможности прокладки кабельных линий в просеках значительно снижается вероятность вырубки деревьев.

### Список литературы

1. Антропов Д.В. Особенности землепользования в зонах с особыми условиями использования территорий // Имущественные отношения в РФ. 2017. № 11. С. 6–10.

2. Библия электрика: ПУЭ (шестое и седьмое издания, все действующие разделы); ПОТ; ПТЭ. Новосибирск: Норматика, 2018. 672 с.

3. Конюченко Д.В. Охранные зоны линейных объектов // Вестник науки и образования. 2015. № 3(5).

4. Лепехин П.А., Кузнецова С.Г. Пути выбора оптимальной модели землепользования на территории охранных зон ЛЭП и трубопроводов // Проблемы землепользования на современном этапе: сб. науч. трудов. ГУЗ, 2011. С. 144–150.

5. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 3 августа 2018 г.) // Собр. законодательства. 2006.

6. О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон: постановление правительства РФ от 24 февраля 2009 г. № 160 // Собрание законодательства. 2009.

7. Роженцова Н.В., Ларионова А.М., Ларионов С.Н. Факторы надежности при проектировании и эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // Известия высших учебных заведений. Электро-механика. 2010. № 4. С. 32–36.

8. Идрисова А.Р., Роженцова Н.В., Мухаметзянова Ф.М. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. Тольятти, 2016. С. 97–100.

9. Классификация и морфологический анализ эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока / И.Р. Нафиков [и др.] // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 72–75.

10. Роженцова, Н.В., Шипилов В.В. Сверхпроводящие линии электропередач // Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике: коллективная монография. Казань, 2014. С. 219–227.

УДК 621.315.2 (98)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА КАБЕЛЬНЫЕ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ, СПОСОБЫ ИХ ПРОКЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Алина Ринатовна Денисова<sup>1</sup>, Юлдуз Бекчановна Самигуллина<sup>2</sup>,  
Гулфия Азаматовна Аманова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>yulduz.sam11@mail.ru, <sup>3</sup>amanova.gulfiya@mail.ru

В статье ставится задача рассмотреть возможность замены воздушных линий электропередач в арктической зоне на силовые кабельные линии. Исследованы способы монтажа, эксплуатация и диагностика кабельных линий. На основе проведенного анализа авторами предлагается прокладка силовых кабельных линий, которые решат основные проблемы, возникающие в данной зоне в связи с нарушением нормальной работы воздушных линий электропередач.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередач, кабельные линии электропередач, замена, арктическая зона, надежность, долговечность.

## **PROSPECTS FOR REPLACING OVERHEAD POWER LINES WITH CABLE IN THE ARCTIC ZONE, METHODS OF THEIR INSTALLATION AND OPERATION**

A.R. Denisova, Y.B. Samigullina, G.A. Amanova

The article aims to consider the possibility of replacing overhead power lines in the arctic zone with power cable lines. The methods of installation, operation and diagnostics of cable lines are investigated. Based on the analysis carried out by the authors, it is proposed to lay power cable lines that will solve the main problems that arise in this zone in connection with the disruption of the normal operation of overhead power lines.

**Keywords:** overhead power lines, cable power lines, replacement, arctic zone, reliability, durability.

Надежность и долговечность воздушных линий (ВЛ) электропередачи в арктической зоне в основном зависят от инженерно-геологических, климатических и геокриологических условий местности их строительства. Наличие сильно пучинистых грунтов, формирование просадочных рытвин, термокарст приводят к смещению, деформации фундаментов опор линий электропередачи и к нарушению геометрического состояния конструкции опор, вследствие чего опоры падают. Также воздействие ветра, гололёдно-изморозевых отложений, гроз и других природных явлений приводят

к наиболее частым технологическим нарушениям (межфазные короткие замыкания в результате схлёста проводов, обрыв проводов) в работе электро-сетевого комплекса. В связи с высокими удельными электрическими сопротивлениями грунтов в рассматриваемой зоне нормируемое сопротивление заземления опор не обеспечивается, вследствие чего при попадании молнии в грозотросы происходят отключения ВЛ по причине обратных перекрытий линейной изоляции [1]. Перечисленные факторы отрицательно сказываются на функционировании электрических сетей, понижая срок эксплуатации линий электропередачи и надежность электроснабжения.

При передаче электроэнергии на большие расстояния необходимо учитывать волновой характер происходящих процессов. Для частоты 50 Гц длина электромагнитной волны составляет примерно 6000 км. Оказывается, что в зависимости от протяженности ЛЭП существуют физические ограничения на передаваемую мощность. Максимум мощности можно передать при длинах ЛЭП порядка 3000 км, что составляет половину длины передаваемой волны. Однако согласно патенту РФ № 2318280 применение коаксиального кабеля, токоведущая жила которого выполнена с кольцевым сечением, приводит к уменьшению внешних габаритных размеров кабеля, устранению ограничений на длину кабельных линий переменного тока, обеспечивая передачу электроэнергии на расстояния, превышающие сотни километров. Поэтому для решения возникающих проблем мы предлагаем заменить воздушные линии электропередачи на кабельные.

Согласно ПУЭ 2.3.31 при сооружении кабельных линий (КЛ) в районах многолетней мерзлоты следует учитывать физические явления, связанные с природой многолетней мерзлоты. В зависимости от местных условий кабели могут прокладываться в земле (в траншеях) ниже деятельного слоя, в деятельном слое в сухих, хорошо дренирующих грунтах, в искусственных насыпях из крупноскелетных сухих привозных грунтов, в лотках по поверхности земли, на эстакадах. Также рекомендована совместная прокладка кабелей с трубопроводами теплофикации, водопровода, канализации и т. п. в специальных сооружениях (коллекторах) [2].

Прокладка кабелей в траншеях является наиболее простой и дешевой. Она экономична по такому важному показателю, как расход цветного металла, так как при прокладке в земле пропускная способность кабеля увеличивается по сравнению с другими способами прокладки за счет лучшего охлаждения. Прокладка в вечномёрзлых грунтах должна выполняться в каналах из монолитного железобетона с покрытием для гидроизоляции. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (ПвП, АПвП) могут

прокладываться в земле с любой степенью коррозионной активности грунта. На сложных участках кабельной трассы прокладываются кабели с усиленной защитной полиэтиленовой оболочкой (ПвПу, АПвПу); в грунтах с повышенной влажностью – кабели с дополнительной продольной герметизацией (ПвПг, АПвПг). Стальные трубы следует применять в тех случаях, когда механическая и термическая прочность пластмассовых труб недостаточна, а также исходя из условий обеспечения взрыво- и пожаробезопасности установок и экономической целесообразности. В стальных трубах можно прокладывать кабель и изолированные провода в защитной оболочке.

Помимо перечисленного нами рассматривается возможность прокладки кабельных линий по аналогии с газо- и нефтепроводами. Она осуществляется в так называемых арктических трубопроводах. Это магистральные трубопроводы, сооружаемые на территории, ограниченной Южным полярным кругом. Основные особенности арктических трубопроводов определяются спецификой климатических условий. Переходы арктических трубопроводов сооружаются на свайных опорах. При строительстве таких трубопроводов устанавливают устройства для компенсации продольных деформаций и принимают меры для предотвращения колебаний трубопроводов от действия ветра [3].

При эксплуатации кабельных линий должны быть организованы осмотры, текущее обслуживание, различные виды испытаний и ремонтов. Осмотры КЛ напряжением на 110–220 кВ должны проводиться:

- не реже 1 раза в месяц для трасс кабелей, проложенных в земле;
- не реже 1 раза в 3 месяца для трасс кабелей, проложенных в коллекторах и туннелях.

Для КЛ, проложенных открыто, осмотр кабельных муфт должен производиться при каждом осмотре электрооборудования [4]. Наряду с перечисленными мерами по обслуживанию кабельных линий также необходимо проводить диагностику технического состояния КЛ.

Одним из наиболее современных и эффективных диагностических систем, предназначенных для оценки состояния изоляции всех типов кабелей методом контроля характеристик частичных разрядов (т. е. микрозарядов, возникающих в местах не однородности изоляции при рабочем напряжении), является система OWTS (Oscillating Wave Test System). Она позволяет определять величину, интенсивность, напряжение возникновения и гашения частичных разрядов, локализовать места их возникновения в КЛ, кроме того, измерять величину тангенса угла диэлектрических

потерь и емкости кабельных линий, так как в данной системе реализован метод измерения ЧР осциллирующим затухающим напряжением. По совокупности данных параметров можно сделать заключение о техническом состоянии и проблемных местах диагностируемой КЛ [5].

Таким образом, замена воздушных линий электропередачи на кабельные решит практически все проблемы, связанные с внешними вредными воздействиями, а именно: исключаются межфазные КЗ в результате схлеста проводов, падения опор, обрыв проводов, перекрытие изоляции, налипание снега, гололёдно-изморозевые отложения, а также значительно сокращаются расходы на техническое обслуживание [6]. Проанализировав ситуацию в арктической зоне, мы пришли к выводу, что кабельные линии являются одним из лучших решений данной проблемы в связи с практичностью их обслуживания и эксплуатации.

### Список литературы

1. Черешнюк С.В., Мерзляков А.С., Назаров И.А. АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Применение геоинформационных технологий для оценки технического состояния воздушных линий электропередачи 110–220 кВ проходящих в сложных климатических и инженерно- геологических условиях // Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей (РУМ). 2007. № 5, 8.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
3. Нефтегазовая микроэнциклопедия: краткий электронный справочник по основным нефтегазовым терминам с системой перекрестных ссылок / М.А. Мохов [и др.]. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 125 с.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 304 с.
5. Диагностика кабельных линий классов напряжения 35–110 кВ // Энергетика. Электротехника. Связь: [сайт]. URL: [https://www.ruscable.ru/article/Diagnostika\\_kabelnyx\\_linij\\_klassov\\_napryazheniya/](https://www.ruscable.ru/article/Diagnostika_kabelnyx_linij_klassov_napryazheniya/)
6. Роженцова Н.В., Ларионова А.М., Ларионов С.Н. Факторы надежности при проектировании и эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // Известия вузов. Электромеханика. 2010. № 4. С. 32–36.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Дмитрий Борисович Гвоздев<sup>1</sup>, Олег Денисович Архангельский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «МОЭСК», <sup>1,2</sup>НИУ «МЭИ», <sup>2</sup>Российская корпорация средств связи, г. Москва  
<sup>1</sup>GvozdevDB@mpei.ru, <sup>2</sup>ArkhangelskyOD@mpei.ru

В настоящей статье показана актуальность проблемы обеспечения безопасности (в том числе, информационной) электроэнергетических систем (ЭЭС) в условиях цифровизации. В дополнение к существующей в настоящее время оценке надежности ЭЭС предложено проводить оценку рисков. Показаны методические подходы к оценке рисков сложных ЭЭС, позволяющие получить интегральный риск для рассматриваемого объекта или системы. В качестве математического аппарата предложено использовать нейро-нечеткие сети (ННС). Для решения проблемы создания обучающей выборки для ННС предложено использовать концепцию полунатурного моделирования с использованием цифрового симулятора RTDS.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления, SCADA, безопасность автоматизированных систем, экспертные оценки, нечеткая логика, оценка рисков в условиях неопределенности.

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO RISK ASSESSMENT IN COMPLEX POWER SYSTEMS

D.B. Gvozdev, O.D. Arkhangelsky

Problem of cybersecurity in electric power systems (EPS) is discussed in this article. Risk assessment is proposed in addition to the current reliability assessment of the of EPS. Methodical approaches to risk assessment of complex EPSs, which allow to evaluate an integrated risk for the system under consideration, are shown. It is proposed to use neuro-fuzzy networks (NFN) as a mathematical tool. To create a training set for the NFN, it was proposed to apply hardware-in-the-loop (HIL) modeling using the real time digital simulator (RTDS).

**Keywords:** automated control systems, SCADA, security of automated systems, expert assessments, fuzzy logic, risk assessment in conditions of uncertainty.

Современные ЭЭС характеризуются интеграцией физической (электро-сетевой) и информационной инфраструктур, то есть приобретают черты кибер-физических систем. В таких системах обе составляющие (физическая и информационная) оказываются в равной степени сложными и взаимно влияющими друг на друга [1]. Однако неизбежным следствием такой взаимной интеграции физической и информационной инфраструктур становится появление новых, ранее несвойственных для электроэнергетики угроз и уязвимостей.

Интеллектуализация сетей, с одной стороны, значительно упрощает как эксплуатационное обслуживание, так и оперативно-диспетчерское управления сетями [2]. С другой стороны, наличие непосредственного взаимодействия с управляемым объектом значительно повышает критичность систем автоматизированного диспетчерского управления и сетей связи, в связи с чем особенно актуальной становится проблема потенциальных кибератак на объекты электроэнергетической инфраструктуры и, как следствие, нарушения управляемости ЭЭС.

Повышенное внимание к проблеме информационной безопасности и возможным нарушениям функционирования АСДУ в результате информационных воздействий неслучайно. Согласно результатам исследований, проведенных в 2017 г. [3], наибольшее число кибератак пришлось именно на предприятия электроэнергетического комплекса (38,7 % от общего числа атак). Известно о ряде успешных атак на электроэнергетические предприятия, приведших к ограничению, а в ряде случаев и полному прекращению электроснабжения потребителей. Очевидно, что с внедрением информационных систем проблема будет усугубляться, поскольку в рамках концепции «цифровых энергообъектов» программное обеспечение и информационные системы становятся одним из наиболее важных (и, в тоже время, уязвимых) элементов кибер-физической ЭЭС.

### **Подходы к обеспечению безопасности ЭЭС**

В связи с указанными выше аспектами, в настоящее время актуальной становится задача обеспечения безопасности функционирования создаваемой интеллектуальной электроэнергетической системы. Предлагается наряду с существующими критериями надежности системы ввести понятие «риска» и проводить оценки безопасности функционирования ЭЭС с применением теории рисков в дополнение к существующей оценке надежности ЭЭС и различных подсистем.

Для этого необходимо сформировать методы и подходы, позволяющие проводить анализ безопасности по целому ряду факторов, многие из которых не характерны для «не цифровых» ЭЭС, но оказывают значительное влияние на кибер-физические системы (например, наличие удаленного доступа к устройствам или ресурсам). В качестве основы для проведения анализа рисков предлагается использовать математический аппарат гибридных нейро-нечетких сетей (ННС), обладающий преимуществами как нейронных сетей, так и нечеткой логики [4].

С учетом сложности и неоднозначности рассматриваемой системы, для обучения нейронной сети предлагается использовать полунатурную модель электроэнергетической системы [5]. Проведение ряда экспериментов, в ходе которых моделируются аварийные ситуации на энергообъектах, позволит уточнить входные данные для ННС, что позволит провести корректное первичное обучение сети.

Для создания подобных моделей в качестве симулятора ЭЭС предложено использовать вычислительный комплекс реального времени Real Time Digital Simulator (RTDS) с программным обеспечением RSCAD, позволяющим проводить моделирование участков электроэнергетической системы, первичного и вторичного оборудования энергообъектов в реальном времени. Кроме того, данный вычислительный комплекс имеет возможность подключения к реальным интеллектуальным устройствам посредством аналоговых, дискретных и интерфейсных сигналов. Разработанный на базе ЗАО РКСС лабораторный комплекс полунатурного моделирования состоит из следующих основных элементов (рисунок):

1) автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора с установленным ПО для моделирования участка ЭЭС и первичного оборудования электрических подстанций;

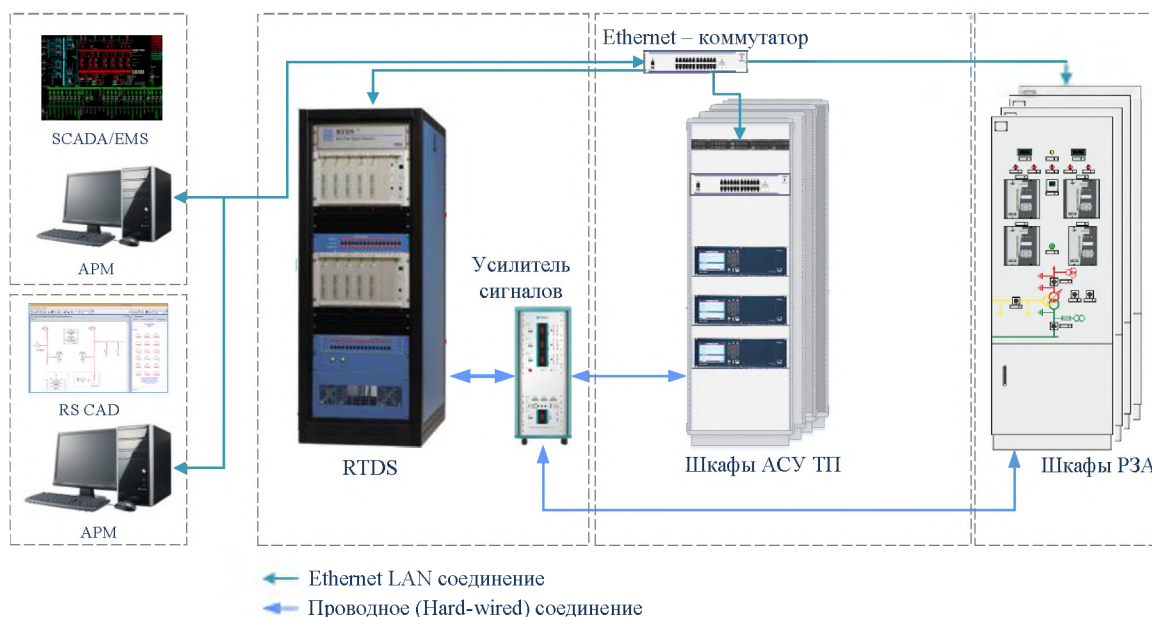
2) вычислительный комплекс RTDS, обеспечивающий расчет модели ЭЭС в реальном времени и взаимодействие модели с внешними устройствами;

3) шкафы усилителей, предназначенные для формирования входных сигналов тока и напряжения для включенных в контур моделирования терминалов РЗА;

4) шкафы с устройствами РЗА, АСУ ТП и другими интеллектуальными устройствами «полевого» уровня цифровой подстанции.

Применение разработанной киберфизической модели позволит верифицировать предположения экспертов касательно развития различных аварийных ситуаций и при необходимости скорректировать входящие в обучающую выборку пары экспертных оценок «влияющие факторы – риск». Повышение достоверности оценок достигается за счет возможности имитации действий оперативно-диспетчерского персонала (при включении в контур моделирования SCADA-систем), моделирования индивидуальных особенностей реальных электрических сетей и энергообъектов, а также возможности учесть при построении модели инфраструктурную избыточность, резервирование, работу систем противоаварийной автоматики, релейной защиты, различных вспомогательных и измерительных систем и т. д. На лабораторном комплексе производится симуляция работы участка электрической сети с учетом функционирования различных автоматизированных и автоматических систем управления и интеллектуальных устройств.





Логическая схема лабораторного стенда

Моделирование участка ЭЭС с включенными в контур моделирования устройствами РЗА и АСУ ТП позволит проводить оценку последствий для различных сценариев нарушения функционирования сложной электро-энергетической системы. В конечном итоге это позволяет сформировать наиболее полную и непротиворечивую обучающую выборку для нейро-нечеткой сети.

После формирования обучающей выборки проводится итерационное обучение нейро-нечеткой сети в соответствии с выбранным алгоритмом обучения, после чего с помощью данной сети рассчитывается интегральное значение риска для рассматриваемого объекта. При этом разработанная методика учитывает индивидуальные особенности объекта, неопределенность факторов риска и допускает увеличение количества учитываемых факторов в процессе расчета. Результаты расчетов используются для принятия решений, направленных на снижение уровня риска объектов электроэнергетики. Корректный и своевременный выбор мероприятий по управлению выявленными рисками обеспечивает надежность и безопасность как отдельных объектов электроэнергетики, так и ЭЭС в целом.

В настоящей статье предложены основные методические подходы к оценке надежности и безопасности сложных электроэнергетических систем с применением теории рисков и нейро-нечетких сетей. В рамках данных подходов предложен механизм формирования нейро-нечетких сетей, показана проблема формирования обучающей выборки для нейро-нечеткой сети. Для формирования обучающей выборки для ННС разработана модель кибер-физической системы, выполненная с использованием вычислительного комплекса RTDS, устройств РЗА, оборудования и программного обеспечения АСУ ТП.

## Список литературы

1. Yuxin Wan, Junwei Cao. An Integrated Cyber-Physical Simulation Environment for Smart Grid Applications // Tsinghua Science and Technology. 2014. № 11. P. 133–143.
2. Ливинский П.А., Гвоздев Д.Б. Инновационная энергосистема России в 2050 году // Энергетическая политика. 2017. № 6. С. 16–19.
3. Ландшафт угроз для систем промышленной автоматизации, второе полугодие 2017 // Kaspersky Lab. ICS CERT: сайт. URL: [https://ics-cert.kaspersky.ru/reports/2018/03/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-h2-2017/#\\_Точ508825243](https://ics-cert.kaspersky.ru/reports/2018/03/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-h2-2017/#_Точ508825243) (дата обращения: 02.12.18).
4. Гвоздев Д.Б., Архангельский О.Д. Вопросы оценки рисков нарушения управляемости АСДУ в сложных электроэнергетических системах // Передача и распределения электроэнергии. 2018. № 6(51). С. 46–53.
5. Мережин Н.И. Полунатурное моделирование энергосистем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 1. С. 256–259.

УДК 621.315

### ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПРОТЕКАНИИ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

Вера Васильевна Вахнина<sup>1</sup>, Ольга Владимировна Самолина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ТГУ, г. Тольятти

<sup>1</sup>[eie@tltsu.ru](mailto:eie@tltsu.ru), <sup>2</sup>[eie@tltsu.ru](mailto:eie@tltsu.ru)

В статье рассмотрены вопросы функционирования систем электроснабжения при протекании квазипостоянных токов. Выполнено математическое моделирование трансформаторного оборудования. Дана оценка степени подверженности влиянию квазипостоянных токов силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом конструкции магнитной системы.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, квазипостоянный ток, силовой трансформатор, силовой автотрансформатор, математическое моделирование.

### THE FEATURES OF ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM FUNCTIONING DURING QUASI-DIRECT CURRENTS

V.V. Vakhnina, O.V. Samolina

The article deals with the power supply system functioning during quasi-direct currents. A mathematical modeling of transformer equipment was performed. The assessment of susceptibility level to the quasi-direct currents influence, on power transformers and autotransformers, with taking into account the design of the magnetic system, was made.

**Keywords:** electric power supply system, quasi-direct current, power transformer, autotransformer, mathematical modeling.

В системах электроснабжения нашло широкое применение трансформаторное оборудование. К нему относятся силовые трансформаторы и автотрансформаторы различных мощностей и классов напряжения. Они используются как повышающие на электрических станциях и понижающие на трансформаторных подстанциях [1].

При наличии протяженной заземленной системы проводников возбуждаемое геомагнитной бурей (ГМБ) геоэлектрическое поле создает в ней почти постоянный (квазипостоянный) ток частотой от 0,001 Гц до 0,1 Гц, который принято называть квазипостоянным геоиндуцированным током (ГИТ) [2].

Опыт исследования воздействия геоиндуцированных токов на технические системы составляет более 40 лет в различных странах. В то же время задача защиты от негативных воздействий геомагнитных возмущений не решена окончательно [1].

Наиболее сильное воздействие геомагнитные бури оказывают на силовые трансформаторы и автотрансформаторы. Основным негативным фактором воздействия ГМБ является генерирование ГИТ, протекающих через заземленные нейтрали силовых трансформаторов и автотрансформаторов и вызывающих насыщение стали сердечника [2]. Это приводит к ускоренному старению изоляции силовых трансформаторов и автотрансформаторов, нарушениям электроснабжения.

Влияние возмущений космической погоды на работу электрооборудования рассмотрено для силовых трансформаторов (СТ) типа ТРДН и ТДЦ и силового автотрансформатора АОДЦТН.

В трансформаторе ТРДН–63000/110 с трехстержневой магнитной системой магнитные поля, создаваемые постоянным током, совпадают с путями протекания магнитных потоков нулевой последовательности, т. е. замыкаются за пределами магнитопровода и проходят в основном в немагнитной среде, в том числе по воздуху.

В трансформаторе ТДЦ–400000/220 с бронестержневой магнитной системой магнитные потоки, создаваемые постоянным током, распределяются так же, как и основной магнитный поток, т. е. равномерно по стержню сердечника и замыкаются по магнитопроводу, что приводит к увеличению интенсивности намагничивания магнитопровода постоянным током [1].

Для оценки влияния величины постоянного подмагничивающего тока на значения средней магнитной индукции  $B_0$  построены зависимости средних значений магнитной индукции в поперечных сечениях стержней магнитной системы СТ от величины постоянного тока.

Зависимость  $B_0 = f(I)$  для силового трансформатора ТРДН-63000/110 приведена на рис. 1.

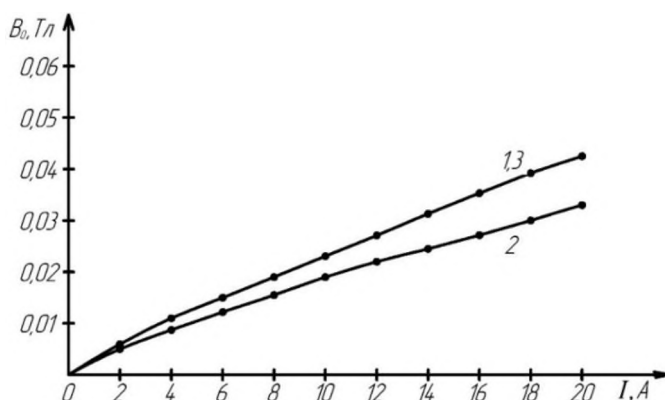


Рис. 1. Зависимость значений средней магнитной индукции от постоянного тока для трансформатора типа ТРДН

Проведенные исследования показывают, что в трансформаторе типа ТРДН силовые линии магнитного поля замыкаются вне сердечника. Среднее значение магнитной индукции в поперечных сечениях стержней  $B_0$  не превышает значения 0,033 Тл в центральном стержне и значения 0,042 Тл в боковых стержнях магнитопровода при протекании постоянных токов по обмотке высокого напряжения.

Зависимость значений средней магнитной индукции от постоянного тока для трансформатора ТДЦ-400000/220 показана на рис. 2.

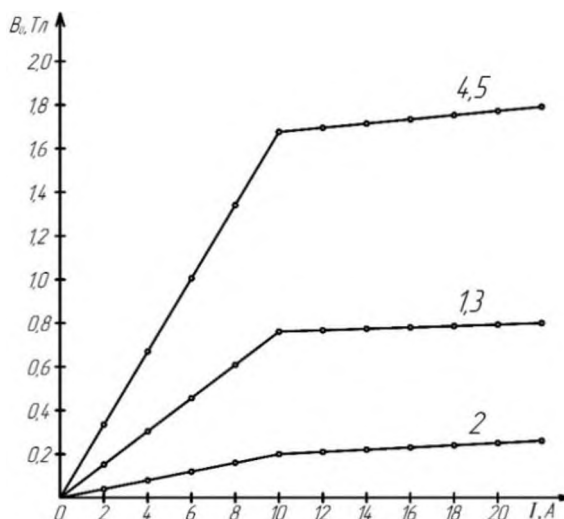


Рис. 2. Зависимость значений средней магнитной индукции от постоянного тока для трансформатора типа ТДЦ

Математическое моделирование однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 позволяет получить следующую зависимость (рис. 3).

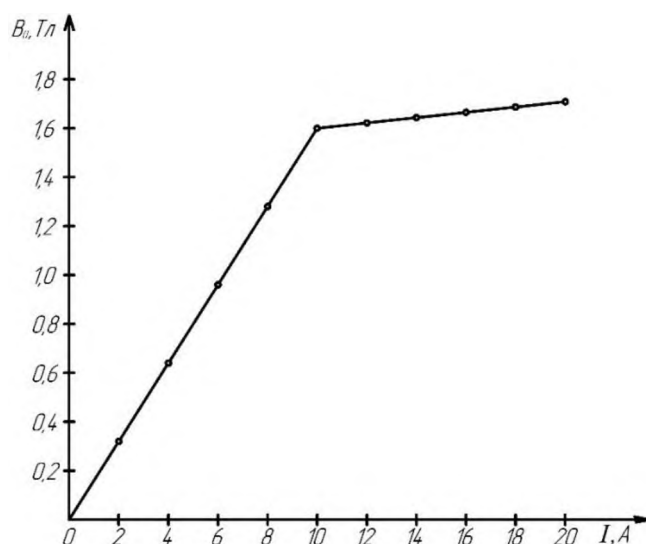


Рис. 3. Зависимость средней магнитной индукции от постоянного тока  $I$  однофазного автотрансформатора АОДЦТН

В силовом автотрансформаторе с броневой конструкцией магнитной системы силовые линии замыкаются внутри магнитной системы через ярма. Магнитный поток, проходящий через сечение ярма, равен половине магнитного потока в стержне магнитопровода. При постоянном токе  $I = 10$  А начинается насыщение магнитопровода силового автотрансформатора, магнитная индукция в стержне  $B_0 = 1,62$  Тл.

Проведенные исследования показывают, что трансформатор ТРДН-63000/110 с трехстержневой магнитной системой практически не подвержен воздействию постоянного тока по сравнению с трехфазным трансформатором ТДЦ-400000/220 с бронестержневой магнитной системой и однофазным автотрансформатором АОДЦТН-267000/500/220 с броневой магнитной системой [1].

При постоянном токе  $I = 10$  А, протекающем по заземленным обмоткам, начинается насыщение магнитопровода трехфазного силового трансформатора ТДЦ-400000/220 с бронестержневой магнитной системой и однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 с броневой магнитной системой, а трехстержневая магнитная система силового трехфазного трансформатора ТРДН-63000/110 не насыщена.

Таким образом, силовые трансформаторы и автотрансформаторы с броневой или бронестержневой конструкцией магнитопровода в большей степени подвержены влиянию возмущений космической погоды, чем силовые трансформаторы и автотрансформаторы со стержневой конструкцией магнитной системы.

## Список литературы

1. Самолина О.В. Влияние геоиндуцированных токов на функционирование однофазных силовых автотрансформаторов систем электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2017. 16 с.
2. Вахнина В.В. Разработка основ теории функционирования систем электроснабжения потребителей при воздействии геоиндуцированных токов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2013. 40 с.

УДК 621.311

## О ВОЗМОЖНОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Александр Александрович Тропин<sup>1</sup>, Иван Николаевич Паскар<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>КузГТУ, г. Кемерово

1tropinaa21@mail.ru, 2paskar-ivan@mail.ru

В данной статье проведен анализ электропотребления ТЭЦ ООО «Абaza-Энерго» и выявление причин перерасхода электроэнергии на предприятии.

**Ключевые слова:** электропотребление, топливно-энергетические ресурсы, анализ, техноценоз, ранговое распределение, коэффициент конкордации.

## ABOUT THE POSSIBILITY OF ELECTRIC POWER STANDING ELECTRIC ENERGY

A.A. Tropin, I.N. Paskar

This article analyzes the power consumption of the TPP LLC "Abaza-Energo" and identifies the causes of overspending electricity at the enterprise.

**Keywords:** power consumption, fuel and energy resources, analysis, technocenosis, rank distribution, concordance coefficient.

Нормирование расходов топливно-энергетических ресурсов является одним из главных направлений политики энергосбережения и служит для решения основных задач: оценка эффективности энергосбережения на промышленных предприятиях; планирование потребления топливно-энергетических ресурсов на собственные нужды; точное оценивание энергетической составляющей себестоимости производства электрической и тепловой энергии; стимулирование промышленных предприятий к рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов.

Нормирование расходов электроэнергии на ТЭЦ ООО «Абaza-Энерго» нужно для решения важнейших задач эксплуатации электрохозяйства. Задача прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии

должна решаться комплексно путём как детального анализа электрического потребления основных производственных цехов, так и с использованием алгоритмов нормирования и прогнозирования потребления электроэнергии на собственные нужды, расхода топлива.

Проанализировав данные потребления основных цехов (топливоподачи, котельного цеха, гидрозолоудаления, турбинного цеха и химводоочистки) ТЭЦ ООО «Абаза-Энерго» за период с 2013 по 2017 гг. включительно, получили график потребления собственных нужд ТЭЦ (рис. 1).

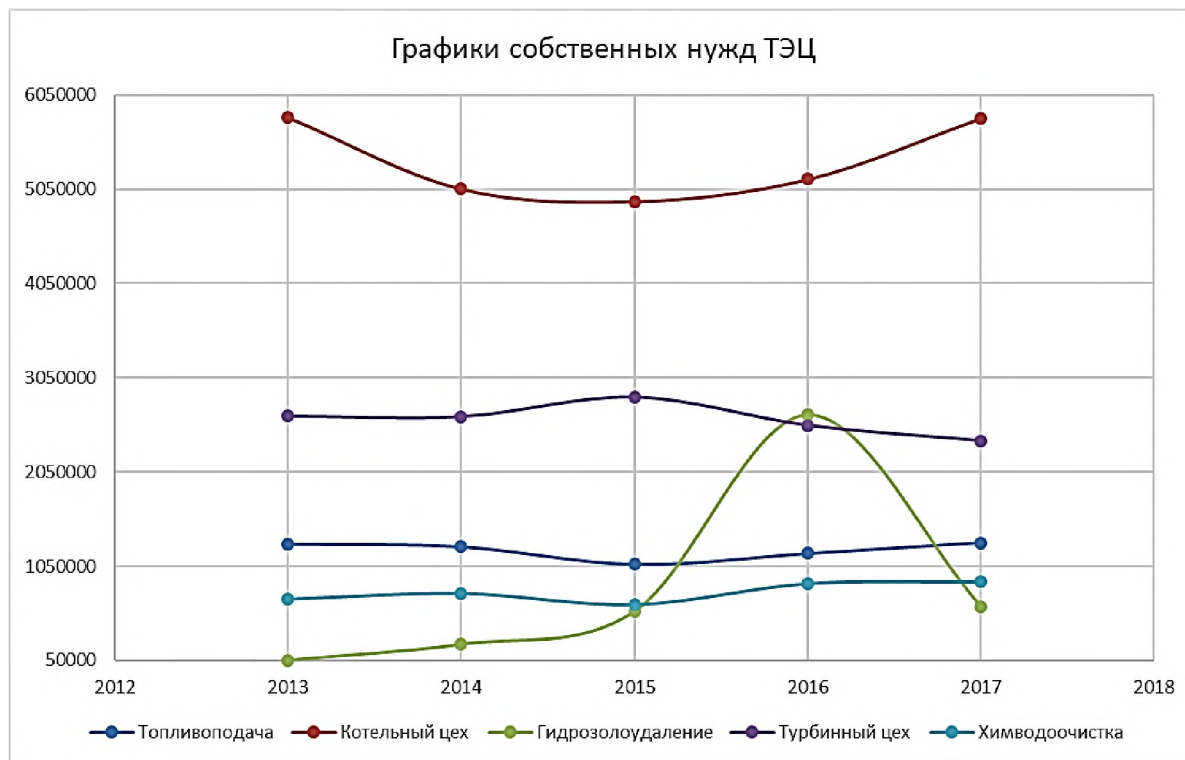


Рис. 1. График собственных нужд ТЭЦ ООО «Абаза-Энерго»

Из графика топливоподачи видно, что он имеет вид практически прямой, это объясняется стабильной работой топливоподачи. В 2015 г. был небольшой спад по причине теплой зимы. График котельного цеха имеет такой вид из-за теплых зим в 2014–2016 гг. По этой причине в эти годы потребление котельного цеха было минимально. График гидрозолоудаления получил такой скачок по причине некачественного топлива и большой его зольности. Турбинный цех имеет график практически прямой с небольшим скачком, связанным с увеличением производства электроэнергии из-за падения производства тепла с целью компенсации затрат. График потребления химводоочистки практически прямой, так как потребление города и промышленных предприятий практически неизменно.

Для нормирования электропотребления станции использовалась техноценологическая теория. Для работы использовался программный комплекс, разработанный В.И. Гнатьюком. Исследование техноценоза начинается со сбора статистической информации об его объектах. В данном случае это будет электропотребление собственных нужд. После сбора информации создаем электронную базу данных, в которой данные представляют собой совокупность значений исследуемых параметров особой техноценоза. База данных представлена в виде двух документов Microsoft Excel. В первом файле приведены данные по электропотреблению объекта исследования со всеми записями и подписями таким образом, чтобы было удобно работать с ними. В другом – только числовые значения параметров, которые вписаны последовательно друг за другом в ячейках таблицы, но уже без подписей. В нем данные формируются в виде двумерной таблицы, где строки – это временные интервалы (в нашем случае – это месяца), а столбцы – это особи техноценоза. В каждой ячейке таблицы содержится только одно число, которое соответствует исследуемому параметру.

Сначала мы импортируем данные из документа Microsoft Excel в среду Mathcad и задаем начало отсчета.

Двумерная матрица  $V$ , составленная в теле программы, содержит информацию об исследуемом объекте техноценоза, причем каждая строка соответствует определенному временному интервалу (месяцу), а каждый столбец – объекту (цеху). Далее матрицу необходимо вывести и просмотреть (рис. 2).

|    | 1                  | 2                  | 3                  | 4                  | 5                  |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1  | $1.795 \cdot 10^5$ | $8.255 \cdot 10^5$ | $8.244 \cdot 10^3$ | $3.267 \cdot 10^5$ | $8.207 \cdot 10^4$ |
| 2  | $1.491 \cdot 10^5$ | $7.74 \cdot 10^5$  | $8.1 \cdot 10^3$   | $2.937 \cdot 10^5$ | $7.691 \cdot 10^4$ |
| 3  | $3.534 \cdot 10^5$ | $7.609 \cdot 10^5$ | $4.548 \cdot 10^3$ | $2.506 \cdot 10^5$ | $5.688 \cdot 10^4$ |
| 4  | $7.899 \cdot 10^4$ | $5.065 \cdot 10^5$ | $2.016 \cdot 10^3$ | $2.263 \cdot 10^5$ | $5.703 \cdot 10^4$ |
| 5  | $4.741 \cdot 10^4$ | $4.056 \cdot 10^5$ | 624                | $1.784 \cdot 10^5$ | $5.045 \cdot 10^4$ |
| 6  | $3.827 \cdot 10^4$ | $2.61 \cdot 10^5$  | 840                | $2.024 \cdot 10^5$ | $5.34 \cdot 10^4$  |
| 7  | $3.253 \cdot 10^4$ | $3.941 \cdot 10^4$ | 576                | $1.921 \cdot 10^5$ | $5.037 \cdot 10^4$ |
| 8  | $1.959 \cdot 10^4$ | $2.23 \cdot 10^5$  | 732                | $1.996 \cdot 10^5$ | $5.524 \cdot 10^4$ |
| 9  | $2.477 \cdot 10^4$ | $2.353 \cdot 10^5$ | $3.636 \cdot 10^3$ | $1.886 \cdot 10^5$ | $1.985 \cdot 10^4$ |
| 10 | $3.652 \cdot 10^4$ | $4.111 \cdot 10^5$ | $6.372 \cdot 10^3$ | $2.076 \cdot 10^5$ | $8.284 \cdot 10^4$ |
| 11 | $1.473 \cdot 10^5$ | $6.571 \cdot 10^5$ | $7.356 \cdot 10^3$ | $1.663 \cdot 10^5$ | $8.052 \cdot 10^4$ |
| 12 | $1.746 \cdot 10^5$ | $7.106 \cdot 10^5$ | $9.744 \cdot 10^3$ | $2.113 \cdot 10^5$ | $7.414 \cdot 10^4$ |
| 13 | $1.764 \cdot 10^5$ | $7.517 \cdot 10^5$ | $1.02 \cdot 10^4$  | $2.448 \cdot 10^5$ | $6.412 \cdot 10^4$ |
| 14 | $1.887 \cdot 10^5$ | $5.872 \cdot 10^5$ | $8.448 \cdot 10^3$ | $2.279 \cdot 10^5$ | $7.012 \cdot 10^4$ |
| 15 | $2.088 \cdot 10^5$ | $5.168 \cdot 10^5$ | $4.652 \cdot 10^3$ | $2.891 \cdot 10^5$ | $8.374 \cdot 10^4$ |
| 16 | $1.011 \cdot 10^5$ | $3.071 \cdot 10^5$ | $4.26 \cdot 10^3$  | $2.391 \cdot 10^5$ | ...                |

Рис. 2. Матрица из тела программы



Далее проранжируем неупорядоченные эмпирические данные, располагая данные в порядке уменьшения значений электропотребления. Для подготовки данных определяется количество исследуемых объектов и формируется вектор рангов.

Затем представим параметрическое распределение в графической форме в виде двумерного и трехмерного графиков (рис. 3, 4).

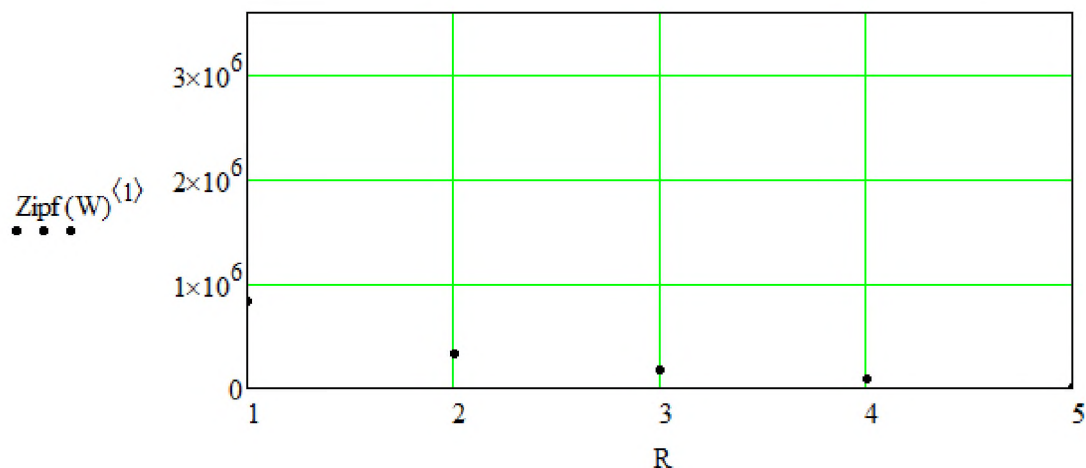


Рис. 3. Ранговое распределение техноценоза (по состоянию на первый месяц исследования): абсцисса – ранг объекта; ордината – электропотребление

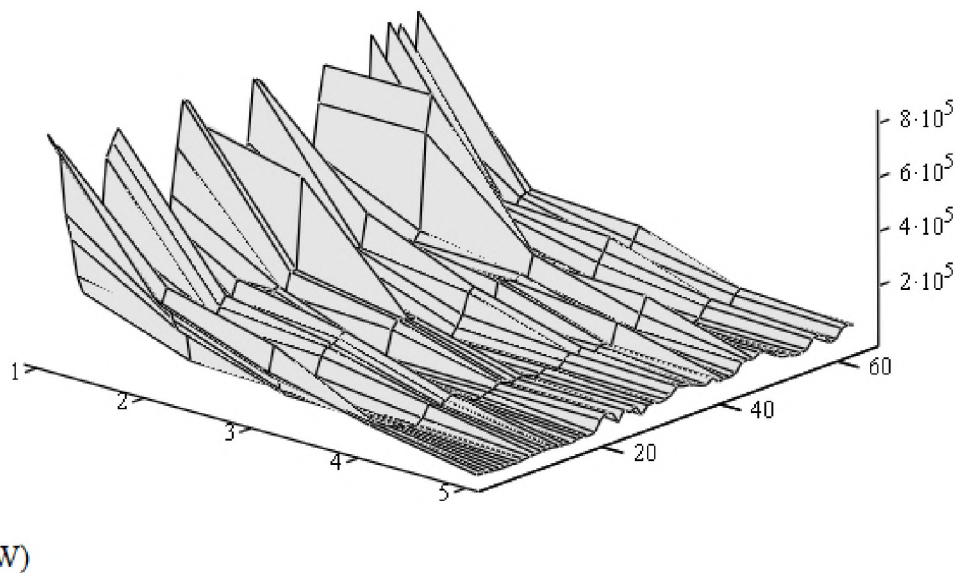


Рис. 4. Трехмерная ранговая поверхность техноценоза: абсцисса – ранг объекта; ордината – временной интервал; аппликата – электропотребление

Вычислив коэффициент конкордации который составил 0,728, видим степень взаимосвязанности техноценоза, согласованность перемещения объектов по ранговой поверхности при переходе от одного временного интервала к следующему.

Исходя из данных, которые использовались в данной работе, коэффициент конкордации имеет большое значение, это показывает взаимосвязанность исследуемого объекта техноценоза с параметрами электропотребления. Данный вывод позволяет применить сформированную базу данных для нормирования, интервального оценивания, прогнозирования электропотребления объектов техноценоза.

### Список литературы

1. Современная энергетика / С.М. Алдошин [и др.] // Наука в России. 2013. № 2. С. 17–20.
2. Гнатюк В.И., Гринкевич С.Н. Прогнозирование и анализ электропотребления техноценоза классическим методом // Электрика. 2006. № 1. С. 30–33.
3. Гнатюк В.И. Процедуры рангового анализа по электропотреблению // Электрика. 2007. № 12. С. 13–16.
4. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1978.

УДК 621.311

## ИНТЕРВАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНОЦЕНОЗА КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ПАРАМЕТРУ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Мария Вячеславовна Фролова, Иван Николаевич Паскарь

КузГТУ, г. Кемерово  
mar74476237@ya.ru

В данной статье Кемеровская область рассмотрена как техноценоз. Проведены процедуры верификации и визуализации техноценоза, а также выявлены «аномальные» объекты, которые подлежат особой проработке при оптимизации системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** техноценоз, ранговый анализ, электропотребление, интервальное оценивание, H-распределение, оптимизация СЭС.

## INTERVAL ESTIMATION OF TECHNOLOGY OF THE KEMEROVO AREA ACCORDING TO THE ELECTRIC POWER CONSUMPTION PARAMETER

M.V. Frolova, I.N. Paskar

In this article, the Kemerovo region is considered as a technocenosis. The verification and visualization procedures of the technocenosis were carried out, and “anomalous” objects were identified that are subject to special refinement when optimizing the electricity system.

**Keywords:** technocenosis, rank analysis, electropure- tion, interval estimation, H-distribution, optimization of electricity system.

В данной работе предлагается рассматривать систему энергоснабжения Кемеровской области как техноценоз. Понятие техноценоз, как новый вид ценозов, было впервые рассмотрено Б.И. Кудриным. Под техноценозом понимается ограниченное в пространстве и времени, имеющее слабые связи любое выделенное единство, включающее сообщество изделий [1].

Интервальное оценивание техноценозов позволяет определить объекты, которые отклоняются от нормального распределения и представляют собой объекты с аномальным использованием ресурсов. После выявления таких объектов необходимо проводить мероприятия, повышающие энергоэффективность и увеличивающие функциональные параметры техноценоза. Данные мероприятия следует проводить до тех пор, пока не будут устранены «аномальные» точки, выходящие за границы доверительного интервала.

В данной работе техноценоз Кемеровской области будет рассмотрен по параметру энергопотребления различными секторами. С помощью программного комплекса, разработанного В.И. Гнатюком, будет возможно выявить те отрасли, которые потребляют электроэнергию «аномально».

Распределение потребления электроэнергии между отраслями по данным Кемеровостата представлено в таблице [3].

Таблица

Распределение электропотребления по секторам Кемеровской области, МВт·ч

| Годы | Горная промышленность | Сельское и лесное хозяйство, охота | Строительство | Транспорт и связь | Другие виды экономической деятельности | Население | Потери в электросетях | Отпущено за пределы области |
|------|-----------------------|------------------------------------|---------------|-------------------|----------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|
| 2005 | 24 436,9              | 379,5                              | 48,2          | 1 552,0           | 3 122,2                                | 2 239,8   | 1 730,6               | 2 851,0                     |
| 2006 | 25 438,5              | 267,8                              | 91,4          | 1 677,9           | 3 524,3                                | 2 554,6   | 1 935,4               | 9 419,7                     |
| 2007 | 25 599,3              | 322,3                              | 212,4         | 1 727,2           | 2 619,3                                | 2 728,2   | 2 906,1               | 10 393,2                    |
| 2008 | 25 501,6              | 329,5                              | 186,1         | 2 231,0           | 2 431,0                                | 2 739,4   | 2 847,5               | 15 730,0                    |
| 2009 | 23 693,3              | 325,3                              | 202,8         | 2 181,8           | 1 414,9                                | 2 745,4   | 2 457,0               | 6 624,7                     |
| 2010 | 25 091,3              | 255,0                              | 205,9         | 1 796,4           | 1 941,8                                | 3 086,4   | 1 595,2               | 5 712,5                     |
| 2011 | 25 369,9              | 226,9                              | 203,0         | 1 840,7           | 1 947,0                                | 3 018,8   | 1 376,5               | 4 812,9                     |
| 2012 | 28 907,1              | 228,2                              | 197,9         | 1 875,1           | 1 983,4                                | 3 047,7   | 1 816,0               | 5 522,5                     |
| 2013 | 27 097,9              | 209,7                              | 193,6         | 1 904,5           | 1 793,0                                | 3 104,2   | 1 796,6               | 2 977,9                     |
| 2014 | 26 479,1              | 221,6                              | 200,6         | 2 035,0           | 2 058,4                                | 3 111,1   | 1 786,1               | 4 132,2                     |
| 2015 | 25 629,0              | 208,6                              | 129,2         | 1 708,8           | 1 680,2                                | 3 046,8   | 1 767,9               | 5 140,0                     |
| 2016 | 24 960,0              | 204,1                              | 159,3         | 1 994,3           | 2 232,1                                | 3 704,4   | 1 815,2               | 5 177,9                     |
| 2017 | 25 295,9              | 274,3                              | 128,5         | 2 224,2           | 1 662,1                                | 3 603,8   | 1 743,6               | 4 966,4                     |

Для проведения интервального оценивания техноценоза необходимо осуществить следующие четыре этапа [4].

Первый этап заключается в анализе исходной системы и формировании базы данных для программного комплекса. Объектом исследования являются секторы электропотребления региона. Необходимо учесть, что в данной работе регион рассматривается изолированно от ЕЭС РФ. Электропотребление области в данной работе разделено на восемь секторов.

Второй этап включает в себя работу с программным комплексом. В программный комплекс заносится выборка чисел (электропотребление региона по секторам). Данные формируются в виде таблицы, где столбцы – электропотребление отдельной особью техноценоза, а строки – промежуток времени (обычно каждая строка равна одному году).

Далее происходит ранжирование данных, т. е. упорядочивание объектов по объему потребления электроэнергии.

После чего происходит визуализация исходных данных в трёхмерном пространстве (рис. 1), где по оси абсцисс показан ранг объекта, оси ординат – исследуемый промежуток времени, оси аппликат – объем потребления электроэнергии.

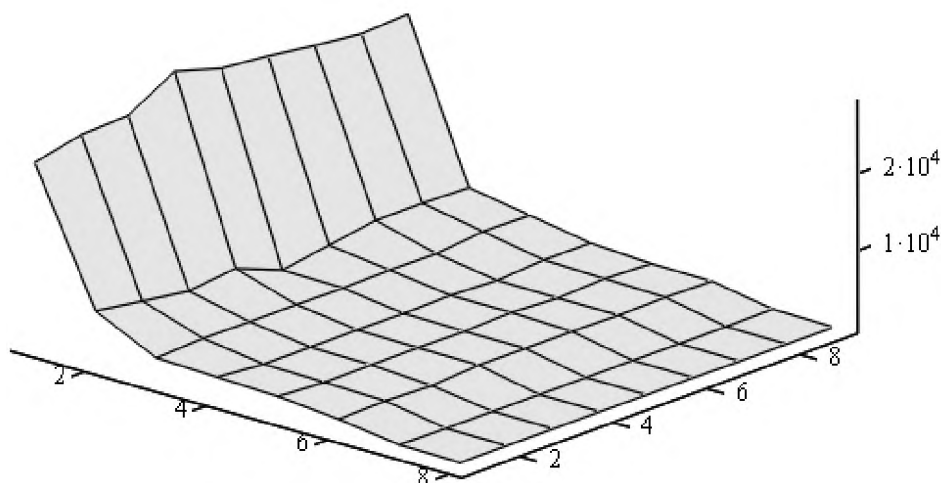


Рис. 1. Трёхмерная визуализация данных

Чтобы подтвердить, что данную систему можно рассматривать как техноценоз, должно соблюдаться условие:

$$0,5 \leq K \leq 1, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент конкордации.

Для вычисления коэффициента конкордации необходимо определить общую сумму рангов, вычислить среднее для рангов, определить общую сумму квадратов отклонений и количество распределений.

Полученный коэффициент равен 0,952. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что данный коэффициент значим, то есть техноценоз по параметру потребления электроэнергии можно считать взаимосвязанным.

Это позволяет использовать исходную базу данных для процедур интервального оценивания, нормирования и прогнозирования.

На третьем этапе необходимо подтвердить две основные гипотезы Н-распределения. Чтобы подтвердить первую гипотезу о том, что данные не подчиняются нормальному закону распределения, необходимо осуществить проверку методом спрямленных диаграмм. В основе данного метода лежит определение квантилей и визуализация их распределения (рис. 2).

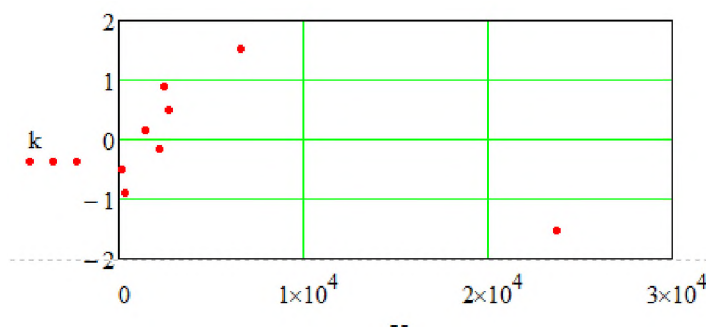


Рис. 2. Проверка гипотезы о несоответствии нормальному закону распределения  
(по оси абсцисс – потребление электроэнергии, МВт·ч;  
по оси ординат – распределение квантилей)

Так как точки на графике не лежат вблизи одной прямой, можно сделать вывод о том, что объекты не подчиняются нормальному закону распределения.

Для подтверждения второй гипотезы о том, что данные представляют собой значимо взаимосвязанную структуру, необходимо осуществить проверку связанных данных с помощью коэффициента конкордации ранговых параметрических распределений. Проверка заключается в подтверждении условия:

$$\chi^2 \leq \chi^{2r}, \quad (2)$$

где  $\chi^2$  – критическая точка рангового распределения при уровне значимости равном 5 %;  $\chi^{2r}$  – критическая точка рангового распределения техноценоза.

По результатам расчета  $\chi^2 = 5,951$  и  $\chi^{2r} = 558$ , что подтверждает вышеизложенное условие и значимость коэффициента конкордации для данного техноценоза.

Заключительным этапом работы является интервальное оценивание техноценоза, в котором рассчитываются границы доверительного интервала. После чего определяется количество «аномальных» точек, выходящих за границы доверительного интервала (рис. 3).

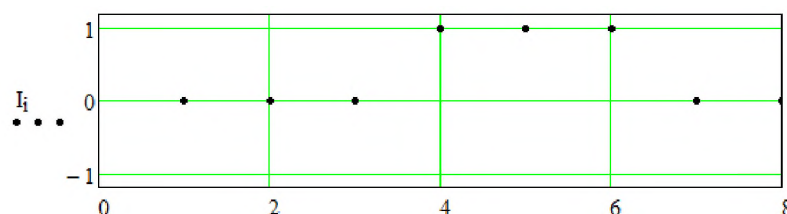


Рис. 3. График, демонстрирующий попадание точек в доверительный интервал

За границы доверительного интервала выходят следующие сектора: другие виды экономической деятельности, транспорт и связь, население. Причем их последовательность определяется величиной отклонения точек от границ доверительного интервала.

### Вывод

1. Кемеровская область может рассматриваться как техноценоз по параметру потребления электроэнергии, так как две основные гипотезы Н-распределения подтверждены.

2. По результатам интервального оценивания можно сделать вывод о том, что электропотребление различными секторами происходит неравномерно и существуют «аномальные» точки, на которые необходимо обратить особое внимание при оптимизации системы электроснабжения региона.

### Список литературы

1. Кудрин Б.И. Введение в технику. 2-е изд. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 552 с.
2. Электробаланс: база данных // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области. URL: [http://kemerovostat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/kemerovostat/ru/statistics/enterprises/production/](http://kemerovostat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/kemerovostat/ru/statistics/enterprises/production/) (дата обращения: 20.11.18).
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: монография. 3-е изд., перераб. и доп. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2014. 476 с.

УДК 621.314

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Надежда Константиновна Афолина

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань  
nadiaafonina1406@gmail.com

Статья посвящена сравнительному анализу тепловых и полупроводниковых источников света. Приведены достоинства и недостатки данных источников света, а также описаны критерии перспективности их использования.

**Ключевые слова:** лампа накаливания, филоментные лампы, полупроводниковые источники, цоколь E27, энергосбережение.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL AND SEMICONDUCTOR LIGHT SOURCES

N.K. Afonina

The article is devoted to a comparative analysis of thermal and semiconductor light sources. The advantages and disadvantages of these light sources are given, as well as the criteria for the prospects of their use are described.

**Keywords:** incandescent lamp, filome lamps, semiconductor sources, E27 base, energy saving.

В настоящее время лампы накаливания стали терять свою популярность на рынке сбыта. С появлением на рынке энергосберегающих ламп, люди стали задумываться, какие лампы будут более выгодны и стоит ли вообще заменять старые лампы накаливания на более усовершенствованные. Мнения по поводу замен ламп в быту разделились, но большинство людей все-таки отдают предпочтение лампам накаливания. В чем причина того, что люди не хотят менять лампы, где до 90 % электроэнергии уходит только на нагрев колбы и окружающей среды, на более экономичные и долговечные модели? Причинами такого выбора выступают привычки к определенной модели, высокая стоимость светодиодных ламп [3].

Имеются различные сферы, где могут использоваться только лампы накаливания:

1. Лампы накаливания обладают очень высокой степенью надежности, поэтому если необходимо постоянное освещение без сбоев в течение долгого времени, то будет выбрана именно старая лампа. Если сделать спираль толще и подойти к вакууму определенным методом, то можно получить высшую степень надежности ламп. До сих пор использование ламп накаливания не прекращается на космических станциях именно из-за повышенной стабильности и бесперебойности в работе.

2. Использование ламп накаливания в сельской местности, там, где постоянно происходят перебои с электроснабжением или постоянные скачки напряжения. Нет никакого смысла ставить светодиодные лампы, так как из-за постоянных перебоев они будут перегорать, несмотря на их внутреннюю защиту. Нет необходимости в дорогих лампах, если придется менять её один раз в неделю.

3. В некоторых случаях при заболеваниях органов зрения врачи строго запрещают использовать светодиодные лампы с холодным и теплым излучением. Также не рекомендуют смотреть на них после операционных вмешательств в офтальмологии. Светодиоды плохо влияют на зрение. Поэтому рекомендуется использовать лампы накаливания [1].

4. Многие фотографы и художники не могут привыкнуть работать при диодовом свете. Они утверждают, что новейшие технологии, которые предоставляет нам рынок, не дают определенного количества тепла, даже если на упаковках указан тот спектр, который им необходим. На данный момент в фотомагазинах имеются специальные особо яркие лампы, которые стоят очень дорого и потребляют немалое количество электроэнергии. Обычно эти лампы потребляют киловатты, особенно если помещение большое и имеет высокие потолки. Не каждый сможет приобрести это оборудование, а старые лампы накаливания в свободном доступе для каждого [2].

5. В некоторых заведениях необходимо, чтобы использовались именно лампы накаливания открытого типа, где будет хорошо видно спирали и прозрачную колбу. Так как это гармонирует с внешним видом комнаты. Обычно используют в дизайнах, таких как Лофт, Арт-деко или High-Tech. Также часто используются лампы накаливания в таком популярном направлении, как SteamPunk.

Для того чтобы не портить здоровье и сохранить красоту в местах, где ранее использовались лампы накаливания, необходимо применять новые технологии. Таким изобретением могут послужить филаментные лампы – современный источник света. Филаментная лампа включает в себе все плюсы ламп накаливания, а также светодиодных ламп. Форма колбы, световая температура и кривая света аналогичны обычным лампам накаливания, а энергосбережение, низкий нагрев колбы и высокий срок службы филаментные лампы взяли от светодиодных ламп с цоколем E27 [4].

Устройство филаментных источников света (рисунок) и конструкция ламп накаливания аналогичны. Блок, состоящий из LED-нитей, закреплен на электродах, которые, в свою очередь, припаяны к стеклянному изолятору аналогично лапам накаливания [5]. Все это помещено в прозрачную герметичную колбу, которая наполнена газом. В отличие от матричных светодиодных ламп в филаментных убрали громоздкие радиаторы. Питание филаментных ламп на LED-нити подается через драйвер, который понижает напряжение до рабочего, а переменный ток преобразуется в постоянный. Такие действия необходимы для уменьшения пульсаций, которые могут негативно сказываться на зрении человека. Драйвер имеет небольшие размеры и находится в самом цоколе.

Филаментные лампы выпускаются в определенном диапазоне потребляемой мощности от 4 до 8 Вт. Это связано с тем, что светодиодные нити имеют проблемы с охлаждением. Такие лампы способны создать



световой поток, равный 980 Лм, со светоотдачей 120 лм/Вт и световой температурой порядка 2700 К. Основными преимуществами филаментных ламп является совместимость с патронами E27 и E14, низкое энергопотребление, большой световой поток и высокое качество света, длительный срок службы. Производители филаментных ламп заявляют срок службы около 30 тыс. часов. Любую филаментную лампу можно утилизировать как бытовой отход, в этом и заключается положительное качество, такое как экологичность [6].



Конструкция филаментной лампы

Несмотря на перечисленные достоинства, филаментные лампы, как и любые недавно выпущенные изделия, имеют ряд недостатков: высокая цена, низкая прочность стекла, большой процент брака, а также отсутствие низковольтных аналогов.

Исходя из сравнительного анализа тепловых и полупроводниковых источников света, сделан вывод, что спрос на филаментные лампы и их производство будет быстро расти благодаря их характеристикам. Для достижения того же уровня спроса, как на лампы накаливания, им необходимо совершенствование.

### **Список литературы**

1. Иванова В.Р., Садыков М.Ф. Интеллектуальная система управления искусственным освещением // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 1. № 6. С. 72–74.

2. Лампа светодиодная: п. м. 119557 Рос. Федерация № 2012110706/07; заяв. 20.03.12; опуб. 20.08.12, Бюл. № 23.

3. Роженцова Н.В., Биктимиров З.М., Шигапов А.В. Формирование политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности в РФ // Научные аспекты современных исследований: сб. ст. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 70–72.

4. Денисова А.Р., Роженцова Н.В. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2010. 313 с.

5. Иванова В.Р. О вредном воздействии синего излучения светодиодов на органы зрения // Зеленая инфраструктура городской среды: современное состояние и перспективы развития: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 46–55.

6. Дони Н.А., Иванов И.Ю., Иванова В.Р. Моделирование дифференциальной защиты линий электропередачи, работающей на базе векторных значений токов // Релейная защита и автоматизация. 2014. Т. 1. С. 14.

7. Ivanova V.R., Fetisov L.V., Bulatov O.A. The Analysis of Measurements of Indicators of Quality of the Electric Power and Calculation of Economic efficiency After Installation of the Booster Transformer // International Multi- Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2018. P. 1–4.

УДК 621.34:629.12

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Токарев Лев Николаевич

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург  
tokset@yandex.ru

В докладе представлены дифференциальные уравнения синхронной машины, преобразованные в соответствии с теорией двух реакций, то есть в осях  $d-q$ . Эти уравнения преобразованы, в свою очередь, автором. Используя преобразованные автором уравнения, можно создавать программы расчёта переходных процессов в автономных электростанциях. В уравнениях напряжения генераторов являются выходными величинами, как и в физических системах. Это обстоятельство позволяет при математическом моделировании получать абсолютно «чистый» холостой ход синхронного генератора без использования каких-либо упрощений и искусственных приёмов.

**Ключевые слова:** синхронная машина, дифференциальные уравнения, преобразование Парка, уравнения Горева-Парка, математическое моделирование, генераторный режим.

# MATH MODELING PROCESSES IN SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEMS

L.N. Tokarev

The report presents the differential equations of the synchronous machine converted Park in line with the theory of two reactions, i.e. in axes  $d$ - $q$ . These equations have been converted, in turn, by the author. Using the equations transformed by the author it is possible to create programs of calculation of transients in Autonomous power plants. In the equations of voltage generators are output quantities, as in physical systems. This fact allows for mathematical modeling to obtain a completely “clean” idle synchronous generator without the use of any simplifications and artificial techniques.

**Keywords:** synchronous machine, differential equations, Park transformation, Gorev-Park equations, mathematical modeling, generator mode.

Поставленная организаторами конференции задача рассмотрения проблем и перспектив развития российской электроэнергетики непосредственно относится и к судовой электротехнике. Концентрация достижений и опыта в этой технически сложной и чрезвычайно разнообразной сфере предоставляет каждому предприятию возможность воспользоваться достижениями науки и техники для собственного совершенствования и развития.

В представленном мной докладе сделана попытка доведения до электротехнической общественности опыта работ в области судостроения. Надо сказать, что мне довелось работать в судостроительной промышленности более 60 лет. В том числе организовать, с нуля, научную работу вновь созданного Постановлением Правительства в 1965 г. Центрального института отрасли по судовой электротехнике, быть заместителем по научной работе у семи директоров, при пяти начальниках Главков и четырех министрах. Заниматься развитием производства судового электрооборудования по всей стране, участвовать, в той или иной мере, в проектировании большинства судов и кораблей в СССР и в России. Параллельно заниматься преподавательской деятельностью в ВУЗах, в гражданском и в военноморском, по совместительству и в качестве штатного преподавателя.

В результате сложилось представление о проблемах и направлениях развития научной и промышленных отраслях, а также в сфере образования. Основными из которых считаю следующие:

1. Десятилетиями не решается проблема связи вузовской науки с промышленностью. Преподаватели ВУЗа слишком часто не имеют заказов от промышленности, не знают, чем она занята, ничего или совершенно недостаточно работают для промышленности. В результате теряют

реальную квалификацию, центральному конструкторскому бюро и заводу становится неинтересно с ними заключать договора. Порочный круг замыкается.

Приятно видеть исключения, относящиеся к таким работам Казанского государственного энергетического университета, как, например, исследования по прочности опор электропередач (исп. группа к.т.н. Л. Сабитова).

2. В отрасли судостроения один из ведущих научных центров пытается подменить в своей деятельности промышленные предприятия и ЦКБ проектанты, беря на себя многомиллиардные обязательства и ответственность за поставку, например, преобразователей частоты судовых систем электродвижения, в том числе для крупнейшего в мире ледокола типа ЛК-60, строящегося на Балтийском заводе.

Неприспособленное к серийному выпуску, к многолетнему производственному сопровождению выпускаемых изделий, высокзатратное опытное производство загружается поставочными заказами, лишая тем самым собственных учёных возможности воплощения в металле новых, прогрессивных идей, загружая их несвойственными проектными работами, отвлекая от поиска новых технических решений. Грубо нарушается сложившаяся веками система совершенствования техники:

- научные исследования – проектирование – производство;
- макет – опытный образец – головной серийный образец.

Каким способом решать такого рода организационно-технические проблемы, как и чем лечить порочную систему? Наверно, способ один – надо растить и выдвигать умных руководителей. На мой взгляд, наш президент очень разумно решает эту проблему стимулированием создания различных школ талантов, типа Казанского центра талантливой молодёжи, конкурсов управленцев и т.п. Без руководителей с искрой таланта прогресс невозможен.

Американский профессор Дреймо Конант очень ярко выразил глубинную сущность организации научной работы в самой главной, самой существенной её, личностной ипостаси. На Всемирной конференции 1959 г. в Новосибирске по организации научной работы он сказал: «Хорошо известно, что как ни поддерживай неодарённого человека, всё равно он ничего крупного и ведущего в науке не сделает. Наука – дело творческое, как искусство, как музыка. Нельзя думать, например, что создав в консерватории отделение по написанию кантат и гимнов, мы их получим, если нет в консерватории крупного композитора, равного по силе, например, Генделю. Хромого не научишь бегать, бескрылого не научишь летать, сколько бы сил и средств на это не потратить».

И вот совершенно конкретный пример, иллюстрирующий необходимость иметь признанного научного лидера в отраслевой науке. Для судов с электродвижением научный центр разработал преобразователи частоты для изменения частоты вращения гребного винта, но никакой защиты от коротких замыканий в звене постоянного тока не придумал. Разработки поставочных изделий центр ведёт, минуя лабораторные исследования, математическое и физическое моделирование, стадию макетирования, реализующего идеи. В результате только при испытании преобразователя частоты (ПЧ) мощностью в тысячи киловатт обнаруживаются особенности физических процессов в виде перенапряжений, вызывающих аварии вентилях (уже сгорело множество вентилях стоимостью во многие десятки тысяч рублей). В поставочных образцах любое КЗ выводит преобразователь из строя, поскольку вентилях горят всего при полуторкратной перегрузке. Если корабль одновинтовой, то при такой аварии он лишается хода и становится тысячетонной, чрезвычайно опасной для соседей неуправляемой массой.

И что особенно прискорбно – решение проблемы такого рода на Западе и в Японии давно придумано. Это так называемый каскадный преобразователь, состоящий из соединённых последовательно нескольких однофазных преобразователей. Каждая такая группа включена в одну из фаз трёхфазной системы. При КЗ одного из однофазных ПЧ всего лишь на 15–20 % снижается номинальная мощность системы.

Ещё в 2010 году я такой японский ПЧ мощностью 800 кВт купил. Изучайте, ребята, создавайте свой, отечественный, по такой же схеме и конструкции. Ничего не вышло. ПЧ сдали на металлолом. Почему не вышло? По простой причине – вся дирекция занята поставками, подменяет научное учреждение проектными и заводскими работами.

Наконец, рассмотрим проблему в области математического моделирования процессов в судовых электроэнергетических системах.

Конкретные наукоёмкие проблемы судовой электроэнергетики, относящиеся к математическому моделированию, заключаются в математическом описании судового электрооборудования, синхронных генераторов с приводными двигателями и автоматическими регуляторами, двигателей электроприводов, преобразователей электроэнергии, а также в создании и совершенствовании методов и методик решения систем дифференциальных уравнений, описывающих эти комплексы. Как известно, в литературе синхронные и асинхронные машины математически описываются уравнениями с преобразованием к ортогональным осям, обозначаемым, обычно, символами « $d$ » и « $q$ ». Этим преобразованием мы обязаны американскому учёному Парку, который в 1929 г. опубликовал свою знаменитую теорию

двух реакций синхронной машины [1]. Профессор Ленинградского политехнического института А.А. Горев в 1950 г. опубликовал книгу «Переходные процессы синхронной машины» [2], в которой использовал работы Парка. С этого момента в России дифференциальные уравнения синхронной машины, преобразованные по Парку, стали именовать уравнениями Горева-Парка. В технической литературе эти уравнения иногда называют «уравнениями в осях  $d$ - $q$ ».

С того времени различные авторы разработали несколько модификаций уравнений Горева-Парка. Модификации отличаются, в основном, различным выбором положительных направлений осей « $d$ - $q$ ». Одна из модификаций уравнений представлена ниже:

$$U_q = -ri_q + wF_d - \frac{pF_q}{w_b}; \quad U_d = -ri_d + wF_q - \frac{pF_d}{w_b}; \quad U_r = i_r + T_r pF_r;$$

$$i_{rd} + T_{rd} pF_{rd} = 0; \quad i_{rq} + T_{rq} pF_{rq} = 0;$$

$$F_d = i_r - x_d i_d + i_{rd}; \quad F_q = x_q i_q + i_{rq}; \quad F_r = i_r - m_d x_d i_d + g_1 i_{rd};$$

$$F_{rd} = i_{rd} + g_2 i_r - m_{ds} x_d i_d; \quad F_{rq} = i_{rq} + m_q x_q i_q;$$

$$M_e = F_d i_q + F_q i_d,$$

где  $U$ ,  $U_d$ ,  $U_q$  – напряжение статора синхронного генератора и его составляющие по осям  $d$  и  $q$ ;  $i$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  – ток статора и его составляющие по осям;  $F_d$  и  $F_q$ ,  $F_{rd}$  и  $F_{rq}$  – составляющие потокосцепления статора и демпферной обмотки ротора по осям, соответственно;  $i_{rd}$  и  $i_{rq}$  – составляющие тока демпферной обмотки по осям;  $F_r$  – потоко-сцепление обмотки возбуждения;  $u_r$  – напряжение на обмотке возбуждения;  $i_r$  – ток возбуждения.

Численные значения коэффициентов уравнений определяются по формулам, приведенным ниже:

$$x_{ad} = x_d - x_s; \quad x_{fs} = \frac{x_{ds} - x_s}{1 - (x_{ds} - x_s)/x_{ad}}; \quad x_f = x_{ad} + x_{fs};$$

$$x_{rds} = \frac{1}{\frac{1}{x_{d2s} - x_s} - \frac{1}{x_{fs}} - \frac{1}{x_{ad}}}; \quad x_{rqs} = \frac{1}{\frac{1}{x_{q2s} - x_s} - \frac{1}{x_{aq}}};$$

$$x_{rd} = x_{ad} + x_{rds}; \quad x_{aq} = x_q - x_s; \quad x_{rq} = x_{aq} + x_{rqs};$$

$$m_d = \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d}; \quad m_{ds} = \frac{x_{ad}^2}{x_{rd} x_d}; \quad m_q = \frac{x_{aq}^2}{x_{rq} x_q};$$

$$g_1 = \frac{x_{ad}}{x_f}; \quad g_2 = \frac{x_{ad}}{x_{rd}};$$

$$x_{rd2s} = x_{rds} + \frac{1}{1/x_s + 1/x_{ad} + 1/x_{fs}}; \quad x_{rq2s} = x_{rqs} + \frac{1}{1/x_{aq} + 1/x_s};$$

$$T_{rd} = \frac{T_{d2s} x_{rd}}{x_{rd2s}}; \quad T_{rq2s} = \frac{T_{d2s} x_{rq}}{x_{rq2s}},$$

где  $x_d, x_q$  – синхронные реактивности статора;  $x_{ds}$  – переходная реактивность;  $x_{d2s}, x_{q2s}$  – сверхпереходные реактивности;  $m_d, m_q, m_{ds}, g_1, g_2$  – коэффициенты магнитной связи обмоток;  $Q$  – вспомогательный коэффициент.

В таком же виде уравнения представлены и в пакете Матлаб-Симулинк, повсеместно используемом сегодня и специалистами, и аспирантами. В разделе «Help» Симулинка трансформаторные ЭДС статора синхронной машины представлены в этих уравнениях производными составляющих потокосцеплений  $dF_d/dt$  и  $dF_q/dt$ . И здесь начинается проблема.

Чтобы составить программу расчёта процессов в электроэнергетической системе, необходимо вначале найти производные потокосцеплений статора:

$$pF_q = (-U_q - r i_q + w F_d) w_b;$$

$$pF_d = (U_d - r i_d + w F_q) w_b,$$

где  $w$  – частота вращения ротора (в относительных единицах);  $w_b$  – базисная частота, рад/с.

Из уравнений видно, что в правой части должны находиться составляющие напряжения статора, а напряжение должно быть искомой величиной, а не входной!

Чтобы разрешить это противоречие, дифференциальные уравнения генератора необходимо либо упростить, за счёт точности расчёта, либо

преобразовать таким образом, чтобы напряжение было выходной величиной, как и в физическом автономном генераторе.

Такое преобразование было выполнено автором. Преобразованные дифференциальные уравнения синхронного генератора имеют вид:

$$\begin{aligned}
 k_{pf} &= pF_r(1 - g_2) + pF_{rd}(1 - g_1); \\
 pF_d &= Qk_{pf} + x_{d2s}pi_d; \quad pF_q = pF_{rq} + x_{q2s}pi_q; \\
 F_d &= Qk_f - x_{d2s}i_d; \quad F_q = F_{rq} + x_{q2s}i_q; \quad Q = \frac{1}{1 - g_1g_2}; \\
 k_f &= (1 - g_2)F_r + (1 - g_1)F_{rd}; \quad k_{pf} = (1 - g_2)pF_r + (1 - g_1)F_{rd}; \\
 U_q &= -ri_q + wF_d - \frac{pF_q}{w_b}; \quad U_d = -ri_d + wF_q + \frac{pF_d}{w_b}; \\
 H_r &= f(F_r); \quad i_r = H_r + m_dx_d i_d - g_1 i_{rd}; \quad pF_r = \frac{u_r - i_r}{T_r}; \\
 i_{rd} &= Q(F_{rd} - g_2 F_r + m_{ds}(1 - g_1)x_d i_d); \\
 pF_{rd} &= -\frac{I_{rd}}{T_{rd}}; \quad i_{rq} = F_{rq} - m_q x_q i_q; \quad pF_{rq} = -\frac{i_{rq}}{T_{rq}}.
 \end{aligned}$$

В программах с использованием этих уравнений напряжение генератора является уже выходной величиной, как в физическом синхронном генераторе. Никакой необходимости в упрощениях уравнений или применении искусственных приёмов не имеется.

И ещё одно усовершенствование в методике моделирования заключается в рациональном математическом описании автоматических регуляторов напряжения. Очевидно, что расчёты процессов в системах с синхронными машинами могут дать практически значимый результат исключительно при наличии в системе уравнений автоматических регуляторов напряжения.

**Уравнения автоматического регулятора напряжения синхронного генератора.** Автору выпала честь впервые в СССР реализовать идею создания серии автоматических регуляторов напряжения синхронного генератора с воздействием по величине и коэффициенту мощности нагрузки [3]. В дальнейшем такие регуляторы стали называться регуляторами с амплитудно-фазовым компаундированием. На основании этих разработок дифференциальные уравнения автоматического регулятора



напряжения синхронного генератора с амплитудно-фазовым компаундированием записываются следующим образом:

$$U = \sqrt{U_q^2 + U_d^2};$$

$$pI_y = \frac{-I_y + k_k (U - U_n + k_{o.c} pF_r)}{T_k};$$

$$u_r = k_u U_q + k_i x_d i_d - i_y,$$

где  $i_y$  – ток управления в регуляторе;  $U_n$  – уставка регулятора напряжения;  $k_k$  – коэффициент усиления измерительного органа регулятора;  $k_u, k_i$  – коэффициенты усиления регулятора по каналам тока и напряжения трансформатора компаундирования;  $k_{o.c}$  – коэффициент усиления звена гибкой обратной связи.

Нелинейности регулятора:

```
if iy > iym then ii = iym;
  if iy < 0 then iy = 0;
if ur > urm then ur = urm,
```

где  $i_{ym}$  – величина ограничения сверху тока управления;  $u_{rm}$  – величина ограничения сверху напряжения возбуждения.

Разработанные уравнения синхронных генераторов с автоматическими регуляторами в течение уже более 40 лет, без изменения, используются в ОСТах судостроительной промышленности (ОСТ5.3060-72, ОСТ5.6140-78, ОСТ 5.6181-81). Корректность этих уравнений иллюстрируется, например, следующим. В 2016-2017 годах Крыловский государственный научный центр, с участием Курчатовского института, решил усовершенствовать систему расчётов процессов в судовых электроэнергетических системах (стоимость работы 110 млн руб.). Вся созданная система расчётов переходных процессов основана на использовании дифференциальных уравнений, разработанных автором и представленных в настоящей статье.

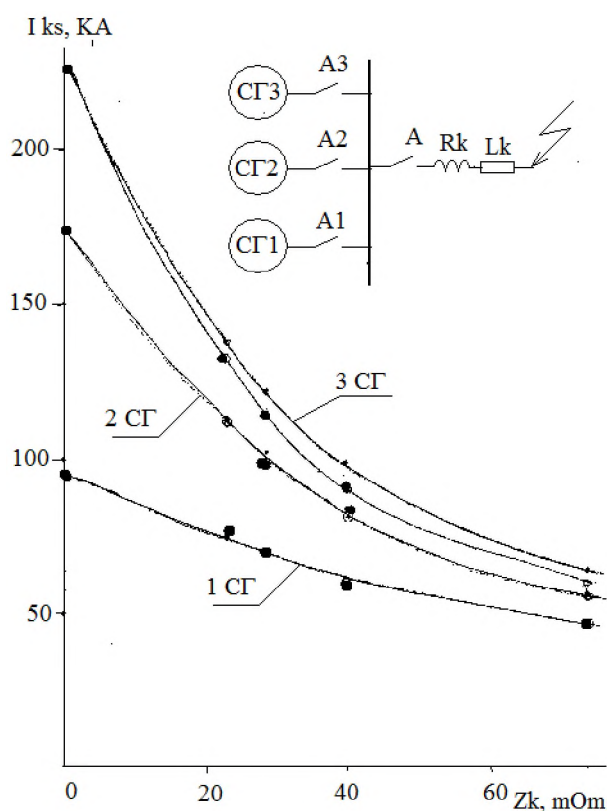
Подробные данные по методике математического моделирования судовых электроэнергетических систем приведены в [4–6].

Корректность уравнений системы «синхронный генератор – автоматический регулятор напряжения» неоднократно проверена и в условиях электротехнического стенда и непосредственно на кораблях.

Результаты наиболее ёмких и уникальных, по составу электрооборудования и условиям испытаний, экспериментальных исследований в режимах коротких замыканий приведены на рисунке. В качестве объекта исследований использован комплекс машин, состоящий из трёх судовых синхронных генераторов мощностью по 3 МВт. Генераторы приводились во вращение синхронными высоковольтными двигателями мощностью по 4 МВт.

Реальная цепь КЗ состояла из специально подобранных активно-индуктивных сопротивлений, составленных из коротких пучков кабеля различного сопротивления.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке в виде величин ударных токов короткого замыкания, полученных при включении генераторов на цепи с активно-индуктивными сопротивлениями разной величины, от нуля до 80 мОм. Эксперименты проводились при коротком замыкании одного генератора, при коротком замыкании двух и трёх параллельно работающих генераторов. Осциллографировались токи во всех цепях схемы. Параллельно проводились расчёты токов КЗ по преобразованным уравнениям. Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных нанесены на графики. Расчётные величины ударных токов КЗ соединены сплошной кривой. Такие же величины, снятые с осциллограмм, нанесены на графике жирными точками.



Результаты экспериментов и расчётов при коротких замыканиях одного, двух и трёх параллельно работающих синхронных генераторов мощностью по 3 МВт при различных сопротивлениях цепи КЗ

## Список литературы

1. Park P.H. Two-reaction theory of synchronous machines // Trans. AIEE. 1929. Vol. 48.
2. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1950. 220 с.
3. Устройство для регулирования напряжения самовозбуждающихся синхронных генераторов: а. с. 155535 СССР № 752082/24-7; заявл. 28.09.61; опубл. 01.01.63, Бюл. № 13.
4. Токарев Л.Н. Математическое описание, расчёт и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. Л.: Судостроение, 1980. 120 с.
5. Токарев Л.Н. Дифференциальные уравнения электрооборудования судовых электроэнергетических систем: программы, расчёты, эксперименты. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 212 с.
6. Токарев Л.Н. Дифференциальные уравнения электрических цепей, машин, преобразователей. СПб.: Изд-во «ЛИТЕО», 2017. 264 с.

УДК 621.317

## ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Марат Мансурович Бахтияров<sup>1</sup>, Наталья Владимировна Роженцова<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>r\_971@mail.ru, <sup>2</sup>natalia15969@yandex.ru

Статья посвящена изучению методов диагностики кабельных линий (разрушающий контроль, неразрушающий контроль). Рассмотрены достоинства и недостатки обоих видов. Отмечены области применения и главные особенности. Исходя из проведенного анализа, был сделан вывод.

**Ключевые слова:** разрушающий контроль, испытание, импульс, рефлектометрия, диагностика, возвратное напряжение, неразрушающий контроль, рефлектограмма.

## DIAGNOSTICS OF CABLE LINES

M.M. Bakhtiyarov, N.V. Rozhentsova

The article is devoted to the study of methods for diagnosing cable lines (destructive testing, non-destructive testing). The advantages and disadvantages of both types are considered. Application and main features marked. Based on the analysis, it was concluded. voltage, non-destructive testing reflectogram.

Повышение роли электроснабжения городов, промышленных предприятий, транспорта, коммунального и других отраслей хозяйства привело к созданию обширной сети кабельных линий, которые обладают повышенной

надежностью и требуют меньших выделяемых площадей по сравнению с воздушными линиями. И поэтому бесперебойная работа систем электро-снабжения напрямую зависит от надежной работы силовых кабелей низких и средних классов напряжения. Поэтому определение места повреждения кабельных линий на расстоянии с минимальными ошибками и наименьшими затратами является важной задачей их эксплуатации.

Для оценки состояния изоляции силовых кабелей в условиях эксплуатации применяются разрушающие методы, которые позволяют получить информацию о текущем состоянии изоляции кабелей, и неразрушающие методы, основанные на периодическом измерении наиболее информативных характеристик изоляции [1]. Каждый метод диагностики имеет свои плюсы и минусы. Разрушающие методы имеют меньшую трудоемкость и экономичны, но не гарантируют последующую безаварийную работу и приводят к сокращению срока службы кабельных линий, а неразрушающие методы позволяют не травмируя кабели прогнозировать остаточный срок их службы, но имеют избыточную сложность и стоимость при диагностике.

Методы разрушающего контроля основываются на профилактических испытаниях повышенным напряжением, т.е. напряжением, в несколько раз превышающим рабочее напряжение. При этом считается, что нормальная изоляция выдерживает испытание, а дефектная пробивается. Устранение дефектов при профилактических испытаниях предупреждает аварийные пробой, во время которых могут возникать и распространяться на другое электрооборудование значительные перенапряжения [2].

Разрушающие методы диагностики:

1. Испытание повышенным выпрямленным напряжением. Приложение повышенного напряжения создает в испытываемой изоляции увеличенную напряженность электрического поля, что позволяет обнаруживать дефекты, вызвавшие недопустимое для дальнейшей эксплуатации высоковольтного кабеля снижение электрической прочности его изоляции. При испытаниях повышенным напряжением постоянного тока особенно отчетливо выявляются местные сосредоточенные дефекты. Плюсы метода – простота и дешевизна, недостатки – не гарантирует последующую безаварийную работу кабельных линий, нередко приводит к сокращению срока службы.

2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытанию повышенным напряжением промышленной частоты подвергается изоляция обмоток трансформатора вместе с вводами. Если кабельная линия выдерживает такие испытания, то, вероятнее всего, она будет долго и безаварийно работать. Но оборудование, необходимое для проведения диагностики, очень громоздкое и дорогое.

3. Испытание повышенным напряжением сверхнизкой частоты. При таком испытании проявляет себя межслоевая и приэлектродная поляризации, т. е. в неоднородном диэлектрике на границе раздела слоев накапливается заряд и у электродов также накапливается заряд. За время смены полярности заряд не успевает уйти на электроды (что характерно для хороших диэлектриков, таких как полиэтилен) и усиливает внешнее электрическое поле. Диэлектрик оказывается под большим напряжением. Метод не допускает развития повреждений в более мелких дефектах, но возникает пробой при наличии сильных дефектов.

4. Испытание повышенным импульсным напряжением. Применяются генераторы импульсных напряжений, которые представляют собой батарею конденсаторов, которые в зарядном режиме включены параллельно, а в разрядном – последовательно. Для коммутации применяются искровые разрядники. В процессе уменьшается «стареющее» действие на изоляцию, четко определяются дефекты в корпусной и витковой изоляции. Но трудно установить, был ли пробой изоляции при испытании или нет.

Неразрушающие методы контроля основаны на многократном измерении и обработке результатов различных физико-химических, тепловых и электрических свойств изоляции кабеля [3].

Основными методами диагностики силовых кабельных линий являются:

1. Метод рефлектометрии – метод, когда все фазы кабельных линий по отдельности проверяются низковольтными импульсами (до 100 В). В России измерения проводят с помощью цифрового рефлектометра РЕЙС-105Р, который определяет расстояние до места повреждения в кабельной линии. Данные инструменты используются для того, чтобы заранее определить место повреждения кабельной линии. Недостатки метода – это сложный анализ полученных рефлектограмм из-за многократных отражений, которые не позволяют в точности определить информацию о повреждениях изоляции.

2. Диагностика кабелей методом возвратного напряжения. Метод состоит в измерении возвратного напряжения в изоляции каждой фазы кабеля 6–10 кВ после зарядки кабеля постоянным напряжением и кратковременной его разрядки. По уже существующим методам эксперты определяют состояние, степень износа и наличие воды в бумажно-пропитанной изоляции кабелей. Самая известная переносная диагностическая система CD31, которая создана в Германии (фирма «Seba-KMT»). Многочисленные опыты доказали, что параметры крутизны возвратного напряжения характеризуют износ изоляции.

3. Испытание силовых кабельных линий напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц. Он используется взамен испытаниям постоянным напряжением. В этом методе используют пониженное напряжение с частотой 0,1 Гц косинусоидально-прямоугольной формы. При напряжении частотой 0,1 Гц процесс смены полярности происходит так же, как и при напряжении частотой 50 Гц.

4. Метод частичных разрядов. Частичные разряды – разряды, которые измеряются в наносекундах и появляются в слабых участках изоляции, приводят к повреждению и постепенному разрушению кабельной линии. Во все времена было большой проблемой проведение измерений частичных разрядов, которые появляются в изоляции. Критериями оценки работоспособности кабельных линий по этому методу можно считать: уровень частичных разрядов, частоту и их интенсивность. Большим минусом этого метода является широкий разброс в оценке нормативов по величине частичных разрядов и различных методик измерений.

5. Тепловизионный метод контроля. Применение тепловизионной диагностики в электроэнергетике основано на том, что некоторые виды дефектов высоковольтного оборудования вызывают изменение температуры и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения, которое регистрируется тепловизионными приборами (пассивная диагностика). Важно, чтобы измерялось собственное излучение обследуемого объекта, которое связано с наличием и степенью развития дефекта [4]. При проведении диагностики необходимо учитывать коэффициент излучения поверхности обследуемого объекта и угол между осью тепловизионного приемника и нормалью к излучаемой поверхности [6]. Достоинством тепловизионного метода является оперативность контроля без вывода электрооборудования из работы.

Таким образом, можно сказать, что разрушающие методы контроля должны применяться в крайнем случае, когда дефект или дефекты изоляции настолько велики, что могут привести к пробое изоляции в условиях эксплуатации. Из известных неразрушающих методов контроля перспективными являются контроль кабельных линий по интенсивности частичных разрядов и метод рефлектометрии [5].

### **Список литературы**

1. Методика испытаний силовых кабельных линий 6–10 кВ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.etlpro.ru/metodiki-ispitanii/metodika-ispitaniy-silovyih-kabelnyih-linij-6-10-kv.html> (дата обращения: 10.01.19).

2. Журнал КАБЕЛЬ-news 2014 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kabel-news.ru/issue/articles/articles\\_285.html](http://www.kabel-news.ru/issue/articles/articles_285.html) (дата обращения: 10.01.19).

3. Рекламно-информационный журнал Электротехнический рынок. [Электронный ресурс]. URL: <https://market.elec.ru/nomer/46/diagnostika-kabelnyh-linij-u-vorot-v-novuyu-erohu>.

4. Управление эффективностью в электроэнергетике: инновационные подходы / Г.В. Вагапов [и др.] // Вестник экономики, права и социологии. 2015. № 3. С. 186–189.

5. Ильин О.В. Симметрии и инвариантные решения одномерного уравнения Больцмана для неупругих столкновений // Теоретическая и математическая физика. 2016. Т. 186. № 2. С. 221–229.

6. Ivanova V.R., Ivanova A.S., Fetisov L.V. The development of an Automated Station for Group Soldering of the Led Lines // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2018. P. 336–338.

УДК 62 –192 + 656.1

## **ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ЕЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Руслан Сергеевич Литвиненко<sup>1</sup>, Виктория Станиславовна Спургис<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1,2</sup>litrus277@yandex.ru

Рассмотрен подход к оценке пропускной способности городской электротранспортной системы с учетом надежности элементов инфраструктуры: тяговых подстанций, контактной сети; рельсовой линии и подрельсового основания (в случае рельсового транспорта). В качестве коэффициента надежности, позволяющего учитывать влияние отказов этих элементов на пропускную способность, предложено использовать коэффициент оперативной готовности.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, надежность, пропускная способность, коэффициент оперативной готовности.

## **CAPACITY OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT SYSTEM WITH REGARD TO THE RELIABILITY OF ITS INFRASTRUCTURE**

R.S. Litvinenko, V.S. Spurgis

The approach to bandwidth estimation of urban electric transport system, taking into account the dependability of the infrastructure elements of traction substations, a contact network; rail lines and rail base (in the case of rail transport). As a safety factor, allowing to consider the impact of failure of these elements on throughput, is proposed to use the operating instantaneous availability.

**Keywords:** electric transport, dependability, bandwidth, operating instantaneous availability.

Городской электрический транспорт (ГЭТ) предназначен для осуществления городских перевозок пассажиров и может включать такие виды городского транспорта с электрическим приводом колес, как трамвай, троллейбус, метрополитен, электробусы, монорельсовый электрический транспорт и т.д. Проектирование городской электротранспортной системы (ГЭТС) осуществляют с учетом обеспечения комфортабельной перевозки пассажиров к месту назначения в минимально короткие сроки.

Основными преимуществами этого вида транспорта являются высокая производительность и экологичность. Современные ГЭТС включают в себя две или несколько транспортных систем, подразделяющихся на основные и вспомогательные. К основным относятся скоростные транспортные системы, характеризующиеся высокой провозной способностью (метрополитен, скоростной трамвай). Вспомогательные транспортные системы предназначены для обслуживания основных и проектируются с учетом обеспечения минимальной зоны пешего хождения пассажиров (троллейбус).

Важнейшим параметром оценки транспортной линии является ее пропускная способность, а в совокупности с провозной способностью она определяет место транспортного комплекса в общей системе городского пассажирского транспорта.

Под пропускной способностью транспортной линии или полосы движения ГЭТ понимается наибольшее количество единиц подвижного состава, которое может быть пропущено через ее поперечное сечение в одном направлении в течение одного часа [1]. Пропускная способность представляет собой максимальную интенсивность движения  $J_{\max}$  транспортных средств [2]:

$$J = \frac{N_{\text{дв}}}{t},$$

где  $N_{\text{дв}}$  – количество транспортных единиц (ТЕ), проходящих через поперечное сечение дороги или полосы движения в единицу времени  $t$ .

В зарубежной литературе даны следующие определения: пропускная способность – это возможность пропустить определенное количество поездов по заданной линии за единицу времени при заданных ресурсах и графике движения [3]; пропускная способность – это способность объекта инфраструктуры обработать (пропустить) определенное количество поездов при соблюдении пунктуальности [4].



Пропускная способность транспортной линии имеет следующие разновидности [5]:

- **наличная** – максимальные размеры движения тяговых единиц (ТЕ), которые могут быть реализованы в зависимости от технического оснащения линии;
- **проектная** – пропускная способность линии, которая может быть достигнута при развитии или модернизации технического оснащения инфраструктуры;
- **потребная** – число ТЕ, которое необходимо реализовать для осуществления плана перевозок пассажиров при планировании инвестиций и проектировании развития линий;
- **результативная** – наименьшая из пропускных способностей элементов транспортной линии (перегоны, станции, перекрестки и т. д.), определяющая максимальное количество ТЕ, проходящих через участок в единицу времени.

В дальнейшем будем рассматривать наличную пропускную способность в отношении элементов транспортной линии и результативную в качестве характеристики линии в целом.

**Пропускная способность элементов инфраструктуры транспортной линии наземного ГЭТ.** Пропускная способность зависит от частоты расположения транспортных узлов, пересечений на линиях и организации движения на них, а также от пропускной способности остановочных пунктов и принятой системы организации движения. Пропускная способность наземного ГЭТ может определяться для перегона, транспортного узла или перекрестка, остановочного пункта. На величину пропускной способности оказывают влияние скорость и состав транспортных потоков на отдельных участках (перегонах), интервал движения подвижного состава, количество пересекающихся направлений и конфигурация узлов пересечений, плотность пешеходного движения и другие факторы.

При определении практической величины пропускной способности ГЭТ необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на пропускную способность транспортной линии: число остановочных пунктов, наличие пересечений с другими линиями и улицами на одном уровне; наличие крутых спусков и подъемов, влияющих на скорость движения; условия видимости на перекрестках и способ регулирования движения и др.

Пропускная способность перегона  $\Pi_{\Pi}$  для одной полосы в одном направлении (ед./ч) теоретически определяется по формуле [6]:

$$\Pi_{\text{п}} = \frac{3600V}{t_{\text{р}}V + \frac{V^2}{2b} + l + l_0}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость движения на перегоне, м/с;  $t_{\text{р}}$  – время реакции водителя (до 1,5 с), с;  $b$  – замедление при экстренном торможении, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – длина подвижного состава, м;  $l_0$  – зазор безопасности между следующими друг за другом транспортными единицами, обычно принимается равным длине поезда, м.

Значение 3600 в знаменателе необходимо, чтобы привести величину пропускной способности от единиц в секунду к единицам в час.

Расчет пропускной способности по формуле (1) ведется для однородного потока. В том случае, когда транспортный поток является разнородным, то ограничиваются величиной  $\Pi_{\text{п}}$ , соответствующей подвижному составу с более низкими динамическими характеристиками. Такая пропускная способность является чисто теоретической и в значительной степени превосходит реальную, так как подразумевает непрерывное движение ГЭТ без остановок.

Пропускную способность линий ГЭТ обычно лимитирует пропускная способность остановочных пунктов  $\Pi_{\text{о.п}}$  [1, 7], которая определяется по формуле:

$$\Pi_{\text{о.п}} = \frac{3600}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4},$$

где  $t_1$  – время, затрачиваемое ТЕ на подход к остановочному пункту, с;  $t_2$  – продолжительность высадки и посадки пассажиров, с;  $t_3$  – продолжительность объявления водителем о прекращении посадки и закрытии дверей (4–8 с);  $t_4$  – продолжительность освобождения остановочного пункта, с.

Так как надежность остановочных пунктов и промежуточных станций транспортных линий, как инженерных сооружений, при надлежащем содержании не оказывает значительного влияния на эффективность функционирования электрического транспорта, а также его пропускную способность, в дальнейшем в рамках статьи эти элементы инфраструктуры рассматриваться не будут.

Несмотря на то, что пропускную способность транспортной линии, как правило, ограничивает пропускная способность остановочных пунктов [1, 2, 7], в городских условиях различные маршруты могут иметь общие

направления (пересекаться), поэтому потребная пропускная способность будет отличаться от наличной и должна определяться для всех элементов транспортной линии (перегоны, перекрестки и т.д.).

**Пропускная способность перекрестков.** Пропускная способность регулируемых перекрестков определяется по формуле

$$\Pi_{\text{рег}} = \frac{3600 \cdot (t_3 - \Delta t)}{T_c \cdot t_p}, \quad (2)$$

где  $t_3$  – продолжительность зеленой фазы светофора, с;  $\Delta t$  – время между включением разрешающего сигнала светофора и пересечением стоп-линии первым транспортным средством,  $\Delta t = 1 \div 3$  с;  $t_p = \frac{t_n + t_6}{V_y}$  – расчетный ин-

тервал прохождения транспортных средств через перекресток, с;  $V_y$  – установленная скорость движения ТЭ через перекресток;  $T_c$  – продолжительность цикла светофорного регулирования (обычно 40...75 с, при желтой фазе – 3...5 с).

В формуле (2) показатель  $\frac{3600}{T_c}$  определяет число циклов светофорного регулирования в час, а  $\frac{(t_3 - \Delta t)}{t_p}$  – количество ТЭ, которое может быть пропущено за один цикл светофорного регулирования. Таким образом, на величину пропускной способности регулируемого перекрестка основное влияние оказывают  $T_c$  продолжительность цикла светофорного регулирования и доля в нем разрешенного сигнала  $t_3$ . Чем сложнее будет светофорный цикл, тем меньше будет отношение  $\frac{t_3}{T_c}$  и соответственно ниже пропускная способность [2].

Пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для троллейбуса:

$$\Pi_{\text{пр.рег}} = \frac{\Pi_{\text{рег}}}{3}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что для троллейбуса пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования в три раза меньше, чем у регулируемого перекрестка.

Пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для трамваев определяется произведением количества ТЕ, пропускаемых за один светофорный цикл, на количество циклов светофора в часе [8]:

$$П_{\text{пр.пер}} = \frac{3600K}{T_c}, \quad (4)$$

где  $K$  – количество ТЕ, пропускаемых за один цикл.

Пропускная способность трамвайного узла (ответвление или примыкание) определяется по формуле [1]:

$$П_{\text{уз}} = \frac{3600V}{(l_n + l_k) + t_b V_{\text{с.п}} + \frac{V_{\text{с.п}}^2}{2b}}, \quad (5)$$

где  $l_k$  – расстояние между серийным и шунтовым контактами (принимаемое 50 м);  $t_b$  – время реакции водителя (0,6...0,8 с) и срабатывания устройства (около 1 с);  $V_{\text{с.п}}$  – скорость прохождения участка со стрелочным переводом (при движении со стороны крестовины 15 км/ч, в сторону крестовины 5 км/ч).

Результативная пропускная способность ГЭТС формируется выбором, в зависимости от вида ТЕ, минимальной из совокупностей значений пропускных способностей элементов соответствующих транспортных маршрутов. При этом необходимо предусмотреть наличие резерва между наличной и потребной пропускными способностями. В зарубежной литературе [9, 10] в этих целях использован показатель доступной пропускной способности – разницы между предельной пропускной способностью, реализуемой на практике, и фактическим объемом трафика ТЕ.

**Анализ существующего научно-методического аппарата оценки пропускной способности ГЭТ.** Анализ существующего научно-методического аппарата оценки пропускной способности ГЭТ и его сравнение с методологией расчета пропускной способности железных дорог [11] позволят сделать ряд замечаний:

1. Существующие методы расчета пропускной способности транспортных линий ГЭТ достаточно устарели и не учитывают современного состояния элементов ГЭТС. Публикации по этой проблематике относятся к 60-80-м годам прошлого века. Исследования пропускной способности железных дорог, в отличие от ГЭТ, были актуализированы в начале 2000-х годов, в частности в 2010 г. была утверждена Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог [11].

2. В качестве временных единиц измерения пропускной способности транспортных линий ГЭТ приняты часы, а провозной способности соответственно перевезенное количество пассажиров в час. Так как пассажиропотоки в сетях ГЭТС меняются по часам суток, дням недели, месяцам и сезонам года, брать в качестве временного интервала один час некорректно. Необходимо проводить оценивание этих показателей хотя бы для суточного периода, чтобы повысить точность и достоверность получаемых результатов.

3. Исследования, проведенные во ВНИИЖТе в 60-70 годах прошлого века, показали, что на использование пропускной способности участков железной дороги влияет уровень надежности технических средств (локомотивов, вагонов, путевых устройств, СЦБ и др.). Рост отказов привел к тому, что их стали учитывать при расчете пропускной способности соответствующим коэффициентом надежности  $\alpha_n$  [11, 12]:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{I},$$

где  $t_{\text{техн}}$  – продолжительность свободного от поездов промежутка времени, предоставляемого для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств, сооружений и т. д.;  $I$  – межпоездной интервал.

Аналогично железнодорожному транспорту, отказы элементов ГЭТ и инфраструктуры транспортной линии оказывают значительное влияние на эффективность пассажирских перевозок [13, 14], поэтому возникает объективная необходимость учета влияния надежности на пропускную способность ГЭТС. Рассмотрение этого вопроса должно проводиться в комплексе с учетом взаимодействия и взаимного влияния всех составляющих процесса пассажироперевозок.

**Подход к оценке пропускной способности элементов ГЭТС с учетом надежности.** Таким образом, формулы (1)–(5) оценки пропускной способности элементов транспортной инфраструктуры ГЭТС в суточном интервале времени с учетом влияния отказов примут следующий вид:

- пропускная способность перегона наземной линии ГЭТ:

$$\Pi_{\Pi}^* = \frac{3600V(24 - t_{\text{техн}})}{t_p V + \frac{V^2}{2b} + l + l_0},$$

- пропускная способность регулируемых перекрестков наземной линии ГЭТ:

$$\Pi_{\text{рег}}^* = \frac{3600 \cdot (t_3 - \Delta t)(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{T_{\text{с}} \cdot t_{\text{р}}};$$

- пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для троллейбуса:

$$\Pi_{\text{пр.рег}}^* = \frac{1200 \cdot (t_3 - \Delta t)(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{T_{\text{с}} \cdot t_{\text{р}}};$$

- пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для трамвая:

$$\Pi_{\text{пр.рег}}^* = \frac{3600K(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{T_{\text{с}}};$$

- пропускная способность трамвайного узла:

$$\Pi_{\text{уз}}^* = \frac{3600V(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{(l_{\text{н}} + l_{\text{к}}) + t_{\text{в}}V_{\text{с.п}} + \frac{V_{\text{с.п}}^2}{2b}}.$$

Для приведения часовой пропускной способности к суточному интервалу был введен множитель  $(24 - t_{\text{техн}})$ , где  $t_{\text{техн}}$  – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых работ по текущему содержанию пути, устройств и сооружений. Как правило, эти мероприятия выполняются во время ночного перерыва в работе ГЭТ и составляют от 4 до 6 часов. В отличие от железной дороги для проведения этих мероприятий в системе ГЭТ нет необходимости искать возможность предоставления технологических «окон» в графике движения поездов, что значительно облегчает работу ремонтных бригад. В то же время проведение неплановых ремонтов по устранению внезапных отказов инфраструктуры ГЭТ может привести к остановке процесса пассажироперевозки на участке, тогда как железнодорожный транспорт имеет возможность в случае грузовых перевозок изменить маршрут либо ликвидировать отставания за счет последующего увеличения скорости.

Рассмотрим, какой физический смысл вкладывается в понятие коэффициента надежности  $\alpha_{\text{н}}$ . В Инструкции по расчету наличной пропускной способности железных дорог [11] под коэффициентом надежности  $\alpha_{\text{н}}$  понимается коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств (инфраструктуры и подвижного состава), и даются фиксированные

значения в зависимости от числа главных путей (однопутные или двухпутные линии) на перегоне и вида тяги (электрическая или тепловозная тяга). Автор [15] в качестве показателя надежности  $R(t)$  технических средств железнодорожного транспорта использует следующее выражение:

$$R(t) = K_{\Gamma} P(t), \quad (6)$$

где  $K_{\Gamma}$  – коэффициент готовности (вероятность того, что в произвольный момент времени техническая система исправна и готова к работе);  $P(t)$  – вероятность безотказной работы технической системы;  $t$  – длительность заданного интервала времени.

В терминах теории надежности техники нет такого показателя, как коэффициент надежности, но исходя из (6) и ГОСТа [16], можно сделать вывод, что в качестве показателя надежности технических средств железнодорожного транспорта используется коэффициент оперативной готовности, так как при определенных условиях он представляет собой произведение коэффициента готовности и вероятности безотказной работы. Под коэффициентом оперативной готовности техники [16] понимается вероятность того, что изделие в данный момент времени  $t_1$  находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале  $(t_1, t_2)$ . В связи с вышеизложенным под коэффициентом надежности  $\alpha_n$ , используемым при оценке пропускной способности транспортной линии ГЭТ, будем понимать коэффициенты оперативной готовности  $K_{o.г}(t_1, t_2)$ , соответствующих элементов транспортной инфраструктуры ГЭТС.

В [13, 14] было предложено рассматривать ГЭТС с позиций системного подхода как сложную техническую систему, состоящую из большого числа элементов, объединенных в следующие подсистемы, непосредственно участвующие в передаче и превращении электроэнергии в механическую работу тяговых электродвигателей в условиях воздействия внешней среды: подсистема тяговых единиц (парк ТЕ); подсистема тяговых подстанций; подсистема контактной сети; подсистема рельсовой линии (для трамвая); подсистема подрельсового основания (для трамвая).

Предложенный системный подход к рассмотрению ГЭТС дает возможность решать задачи по повышению эффективности функционирования с учетом взаимодействия ее составляющих, так как совершенствуя только элементы тягового подвижного состава без модернизации обеспечивающей транспортной инфраструктуры достигнуть повышения каких-либо количественных показателей дорожного движения не получится.

С учетом этих положений и с целью учета влияния уровня надежности различных компонентов транспортной инфраструктуры на пропускную способность транспортной линии ГЭТС, формулы для определения коэффициента надежности по типам ЭТ примут следующий вид:

- для троллейбусной линии:

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{тролл}}(t_1, t_2) = K_{\text{о.г.}}^{\text{тролл}} = \prod_{i=1}^2 K_{\text{о.г.}i}(t_1, t_2),$$

- для трамвайной линии:

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{трам}}(t_1, t_2) = K_{\text{о.г.}}^{\text{трам}} = \prod_{i=1}^4 K_{\text{о.г.}i}(t_1, t_2),$$

где  $K_{\text{о.г.}1}(t_1, t_2)$  – коэффициент оперативной готовности тяговых подстанций;  $K_{\text{о.г.}2}(t_1, t_2)$  – коэффициент оперативной готовности участка контактной сети;  $K_{\text{о.г.}3}(t_1, t_2)$  – коэффициент оперативной готовности участка рельсовой линии;  $K_{\text{о.г.}4}(t_1, t_2)$  – коэффициент оперативной готовности участка подрельсового основания.

Используемые показатели надежности в настоящее время регламентированы ГОСТами для железнодорожного транспорта и его инфраструктуры, но с учетом особенностей эксплуатации могут быть использованы для ГЭТ. Таким образом, применяя коэффициент оперативной готовности в качестве коэффициента надежности соответствующих компонентов (контактной сети, тяговых подстанций, рельсовой линии и подрельсового основания) ГЭТС, находящихся в пределах занимаемых элементами транспортной линии (перегоны, перекрестки, узлы и т.д.), можно скорректировать величину наличной пропускной способности пассажирских маршрутов.

Аналогичным образом для оценки влияния отказов технических средств на пропускную способность железнодорожного участка в работе [15] было предложено выделение в структуре пяти хозяйств, обеспечивающих функционирование перевозочного процесса. В силу особенностей эксплуатации ГЭТ, предлагаемые авторами данной статьи подсистемы несколько отличаются от хозяйств железнодорожного транспорта, описанных в [15], а их количество варьируется в зависимости от вида ТПС. Также автором [15] было отдельно представлено локомотивное и вагонное хозяйство, объединенное в одно для рассмотрения надежности технических средств поезда. В случае ГЭТ предлагается рассматривать влияние отказов инфраструктуры транспортной линии (подсистем электроснабжения и рельсовой сети) на ее пропускную способность, а надежность (готовность) парка ТЕ оценивать с позиции ее влияния на провозную способность ГЭТС в целом.



Таким образом, проанализировав влияние надежности всех подсистем в составе ГЭТС на пропускную и провозную способности, можно определить ее место в структуре городских пассажирских перевозок. Предложенный подход может быть использован для выявления наименее надежных элементов транспортной инфраструктуры, оказывающих влияние на процесс пассажироперевозок ГЭТС, и в случае необходимости принять меры по повышению их эффективности. При создании новых пассажирских маршрутов или модернизации старых описанная методика позволяет практически оценить прогнозируемые показатели дорожного движения и соответствие элементов инфраструктуры транспортной линии возможностям планируемых к использованию ТЕ.

### Список литературы

1. Коссой Ю.М., Поначугин В.А., Ширин В.Н. Организация движения и пассажирских перевозок на городском электрическом транспорте: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2002. 272 с.
2. Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок: уч. пособие для ВУЗов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.
3. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning // Proc. of 1999 Winter Simulation Conf. Piscataway, 1999. P. 1194–2000.
4. Kaas A.H. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet): PhD-thesis. Technical University of Denmark, 1998. 182 p.
5. Абрамов А.А. Управление эксплуатационной работой. Ч. II. График движения поездов и пропускная способность: уч. пособие. М.: РГОТУПС, 2002. 171 с.
6. Самойлов Д.С.. Городской транспорт: учебник для ВУЗов. М.: Стройиздат, 1983. 384 с.
7. Фишельсон М.С. Городские пути сообщения: учеб. пособие для ВУЗов. М.: Высш. школа, 1980. 296 с.
8. Томилин А.И. Организация движения трамваев и троллейбусов. М.: Стройиздат, 1969. 243 с.
9. Браништов С.А., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Методы оценки пропускной способности железных дорог. Ч. 1. Аналитические методы оценки и анализа использования // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 51–57.
10. Браништов С.А., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Методы оценки пропускной способности железных дорог. Ч. 1. Аналитические методы оценки и анализа использования // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. с. 68–74.

11. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. ОАО «РЖД» 16 ноября 2010 г. М.: Техинформ, 2011. 305 с.
12. Левин Д.Ю., Павлов В.Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография. М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 364 с.
13. Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Филина О.А. Исследование технической надежности городской электротранспортной системы // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 8. С. 60–71.
14. Павлов П.П., Идиятуллин Р.Г., Литвиненко Р.С. К вопросу оценки надежности электротранспортной системы города // Бюллетень транспортной информации. 2017. № 5(263). С. 23–26.
15. Ивницкий В.А. Надежность технических средств железнодорожного транспорта и ее связь с пропускной способностью направлений // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 1. С. 6–9.
16. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 33 с.

УДК 621.311

## **ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Григорий Романович Самойленко<sup>1</sup>, Владислав Владимирович Сенько<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара

1Samoilenkog95@mail.ru, 2senko-aees@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы оценки допустимых режимов сложных электро-энергетических систем. Анализируются различные подходы к оценке допустимых режимов систем. Для расчета допустимых по условиям статической аperiodической устойчивости предлагается использовать обобщенные уравнения предельных режимов, основанные на разработанных методах расчета и описания режимов электроэнергетических систем и методах определения допустимых режимов.

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, оценка допустимых режимов, статическая аperiodическая устойчивость, обобщенные уравнения предельных режимов.

## **ASSESSMENT OF ADMISSIBLE MODES OF COMPLEX ELECTRIC POWER SYSTEMS**

G.R. Samoylenko, V.V. Senko

The article deals with the evaluation of permissible modes of complex electric power systems. The author analyzes various approaches to the assessment of the permissible modes of the system. For the calculation of permissible under the conditions of static aperiodic stability it is proposed to use generalized equations of limit modes, based on the developed methods of calculation and description of the modes of electric power systems and methods for determining the permissible modes.

**Keywords:** electric power systems, estimation of admissible modes, static aperiodic stability, generalized equations of limit modes.

При управлении сложными ЭЭС параметры текущего режима допустимой области весьма актуальна. Одним из основных критериев построения этой области является требуемая (нормированная) величина запаса статической апериодической устойчивости [5]. Обеспечение статической апериодической устойчивости (САУ) всегда являлось необходимым условием надежности электроэнергетической системы. Задача расчета допустимого по условиям САУ режима представляет интерес в случаях, когда из-за отсутствия достаточных диапазонов изменения режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) трудно определить режим, одновременно удовлетворяющий всем ограничениям, так как они могут оказаться противоречивыми.

Задача определения режима, отвечающего требуемому запасу статической устойчивости, может быть формализована следующим образом [1, 3]. Вначале предполагается, что уравнения установившегося режима представимы в явном виде:

$$F(X, Y) = Y_0 - Y(X),$$

заданы направление утяжеления  $\Delta \bar{Y}$  и точка исходного режима:

$$\bar{Y}_0 = \bar{Y}(X_0); \quad \bar{Y} = MY.$$

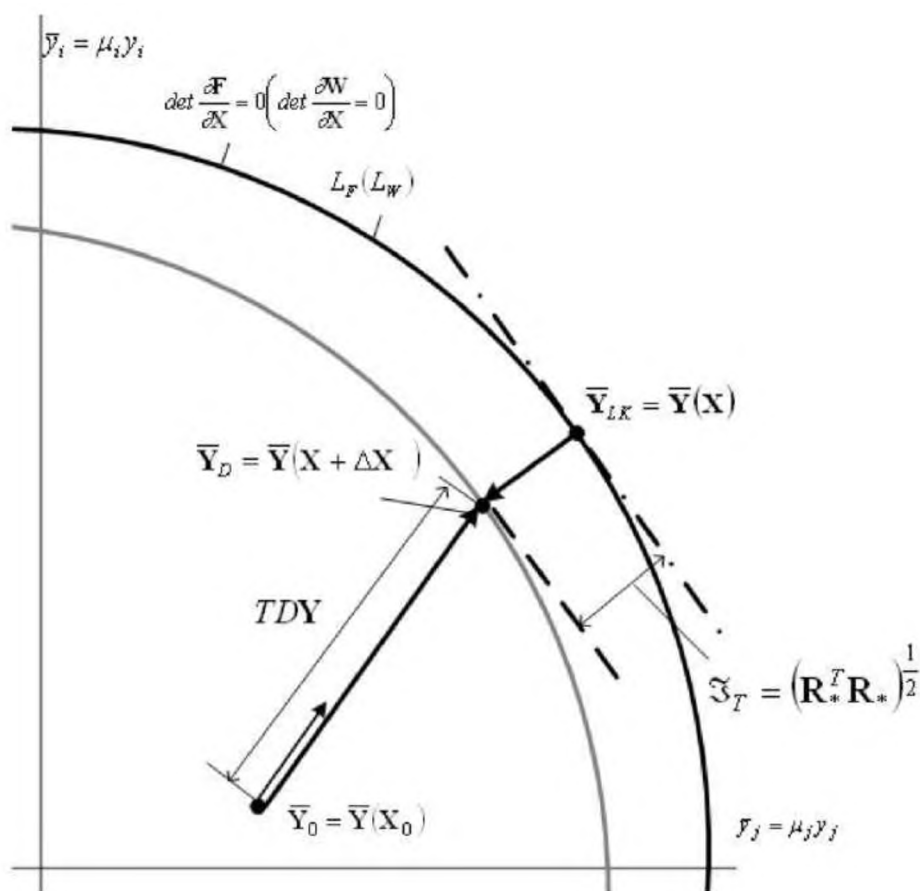


Рис. 1. К определению допустимого режима

Необходимо найти точку  $\bar{Y}_D = \bar{Y}(X + \Delta X)$ , отвечающую границе области допустимых режимов. Данной точке соответствуют параметры  $\bar{Y}_L = \bar{Y}(X)$  гиперповерхности предельных режимов  $L_F$ .

В такой постановке параметры  $X$ ,  $Y_L$ ,  $X + \Delta X$ ,  $Y_D$  могут быть определены из решения системы уравнений [6, 3]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_0 + T\Delta\bar{Y} - \bar{Y}(X + \Delta X) &= 0; \\ \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)^T R_* &= 0; \\ \bar{Y}(X + \Delta X) - \bar{Y}(X) - R_* &= 0, \\ R_*^T R_* - \xi_T^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В работе для нахождения допустимых по условиям статической апериодической устойчивости режимов энергосистемы [2] предложено использовать обобщенные уравнения предельных режимов (ОУПР):

$$\left. \begin{aligned} F \left[ X, Y_0 + T\Delta Y - M^{-2} \left( \frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R \right] &= 0; \\ V(X, R) = \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)^T R &= 0; \\ W(R, T) = R^T \left( \frac{\partial F}{\partial DY} \right) M^{-2} \left( \frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R - \xi^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $M = \text{diag } \mu_i$ .

Расчет произведен для консервативной трехузловой модели энергосистемы, представленной на рис. 2.

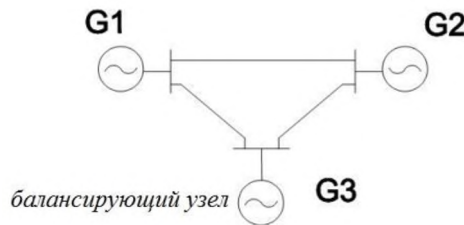


Рис. 2. Трехузловая модель энергосистемы

Наряду с нетривиальными решениями  $X_{пр}^*$ , отвечающим точкам гиперповерхности  $L_Y$ , при расчете запасов устойчивости система ОУПР (1) имеет тривиальные решения, соответствующие исходному режиму. При этом

надежное решение систем ОУПР потребовало создания стартовых алгоритмов, которые позволяют избежать указанных затруднений. Были проведены вычислительные эксперименты с применением методики, основанной на введении фиктивной переменной  $\alpha$  в систему уравнений (2).

Результаты расчетов сведены в таблицу, расчеты проводились для различных направлений утяжеления. По результатам видно, что можно надежно определить за 6–8 итераций искомые допустимые точки  $Y_{di}$  и соответствующие им точки предельной поверхности  $Y_{pri}$  системы ОУПР. В ходе расчетов также было произведено уточнение параметра  $T$  и вектора  $Y_0 + T\Delta Y - M_R^{-2}$  (рис. 3).

Обобщенные результаты расчетов допустимых режимов на итерациях при решении системы уравнений

| № | Напр. утяж.             | Параметры предельных и допустимых режимов |                    |                              |                              | Коэф. запаса |
|---|-------------------------|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|--------------|
|   | $\Delta P_1/\Delta P_2$ | $P_{1пр}/P_{2доп}$                        | $P_{2пр}/P_{2доп}$ | $\delta_{1пр}/\delta_{1доп}$ | $\delta_{2пр}/\delta_{2доп}$ | $K_{iH}$     |
|   | МВт                     | МВт                                       | МВт                | град                         | град                         | о.е.         |
| 1 | 0/10                    | 238,4/200,0                               | 828,9/782,0        | 77,0/56,0                    | 96,9/73,3                    | 0,2          |
| 2 | 10/2                    | 703,6/653,5                               | 323,8/290,7        | 108,9/81,0                   | 71,9/53,0                    | 0,2          |
| 3 | 10/10                   | 540,3/496,3                               | 534,8/496,3        | 98,2/84,1                    | 73,1/62,8                    | 0,2          |

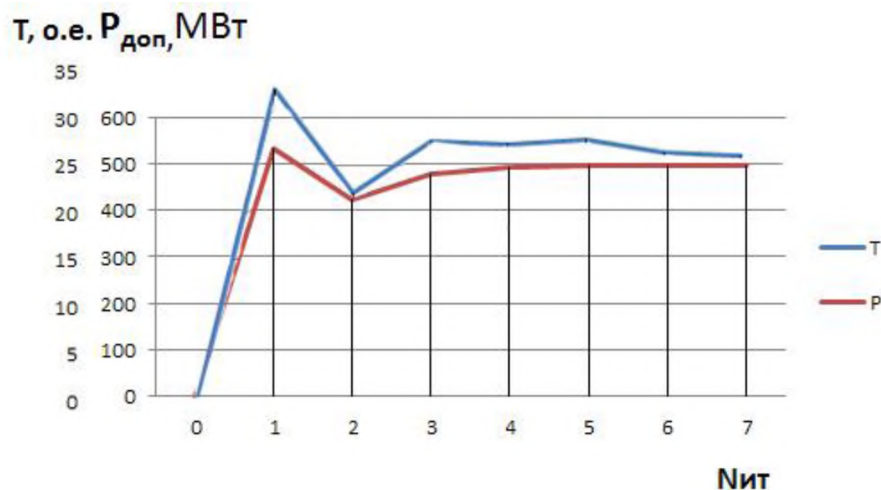


Рис. 3. Изменение параметра  $T$  и величины вектора  $Y_0 + T\Delta Y - M_R^{-2}$

## Выводы

1. Показано, что на основе обобщенных уравнений предельных режимов может быть реализована эффективная методика определения режимов энергосистем, отвечающих требуемой величине запаса статической

устойчивости. С помощью экспериментальных исследований выявлено, что указанная методика применима также для ввода режимов в допустимую область по заданным траекториям изменения регулируемых параметров.

2. Для увеличения надежности сходимости численных методов решения рассмотренных уравнений к искомому решению необходимо использовать специальные стартовые алгоритмы. Проведенные исследования сходимости и неоднозначности вычислительных процессов при решении ОУПР показали, что предложенные алгоритмы применимы в задачах планирования и оперативного управления сложными ЭЭС.

### Список литературы

1. Крюков А.В., Давыдов В.В., Сактоев В.Е. Оценка запасов устойчивости и определение допустимых режимов энергосистем. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 1988. Деп. в Информэнерго. № 3002-эн88.
2. Крюков А.В. Математические модели предельных режимов сложных энергосистем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1. 2004. С. 97–103.
3. Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 236 с.
4. Крюков А.В. Математические модели предельных и допустимых режимов сложных энергосистем энергосистемами. Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. технол. ин-та, 1992.
5. Лукашов, Э.С. Введение в теорию электрических систем. Новосибирск: Наука, 1981.
6. Определение допустимых по условиям устойчивости режимов сложных энергосистем / А.М. Конторович [и др.]. Л.: ЛПИ, 1988. Деп. Информэнерго. № 2864-эн88.
7. Маркович И.Н., Баринов В.А. О критерии статической устойчивости, базирующемся на сходимости итерационного процесса установления исследуемого режима // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1970. № 5.
8. Чемборисова Н.Ш., Насыров Т.Х. Приближенные методы оценки предельных по статической устойчивости режимов // Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений. СПб, 1994. С. 23–29.
9. Веников, В.А. Электрические системы: учебник / под ред. В.А. Веникова. М.: Высшая школа, 1982.
10. Крюков А.В., Сенько В.В. Определение допустимых режимов и оценка запасов устойчивости энергосистем // Проблемы развития электроэнергетических систем: матер. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. СПб: СПбГТУ, 1992.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ

Сидоров Александр Евгеньевич<sup>1</sup>, Галиев Азат Рафикович<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>asidorini@rambler.ru

В работе рассматриваются вопросы оптимизации распределительных сетей электрической энергии и дан полный анализ процесса оптимизации.

**Ключевые слова:** оптимизация, распределительные сети, электрическая энергия, модернизация.

## OPTIMIZATION OF DISTRIBUTIVE NETWORKS OF ELECTRIC ENERGY WITH MODERNIZATION OF EXISTING

A.E. Sidorov, A.R. Galiev

The paper discusses the optimization of electricity distribution networks and provides a complete analysis of the optimization process.

**Keywords:** optimization, distribution networks, electric energy, modernization.

Рост спроса на электроэнергию является основным трендом развития энергетической отрасли, которая определяет ход развития электрических сетей в России. Спрос на электроэнергию в России значительно смещается в сторону населенных пунктов и густонаселенных регионов, в то время как в сельских местностях происходит снижение потребления энергии, возникает недозагруженность систем электроснабжения, что приводит их к работе с низким коэффициентом использования. С изменением спроса на электроэнергию возникает необходимость проводить оптимизацию электрических распределительных систем.

К основным факторам, определяющим целесообразность реконструкции распределительных линий, относятся:

- увеличение мощностей линий и количества потребителей;
- необходимость оптимизации их загруженности.

При традиционных методах проектирования принятие решения осуществляется на основе технико-экономического сравнения различных вариантов, степень приближенности которых к оптимальному определяется квалификацией и опытом специалистов, занимающихся разработкой проектов. Трудоемкость процесса технико-экономических расчетов наряду с невозможностью утверждения того, что среди предложенных содержится оптимальный вариант, обуславливает необходимость поиска и разработки методов, позволяющих находить с использованием автоматизированных систем такие проектные решения, которые не могли бы быть улучшены специалистами самой высокой квалификации.

В этом случае повышается технический уровень проекта, а процесс проектирования автоматизируется. Необходимо отметить, что в настоящее время далеко не все критерии, которым должна удовлетворять проектируемая система электроснабжения, могут иметь корректную количественную оценку. Это относится, например, к степени дефицитности применяемого электрооборудования и материалов, их унификации в данном проекте и ряде других. Поэтому постановка задачи создания автоматической системы проектирования, роль специалистов в которой сводится лишь к подготовке исходных данных, преждевременна. Однако возможно и необходимо создание системы автоматизированного проектирования, позволяющей получать проектные решения при условии, что специалистами предварительно осуществляется анализ исходных данных с точки зрения количественно не оцениваемых критериев, и на основе этого анализа производится селективный ввод данных в систему с целью исключения возможности получения нежелательных результатов. Так, например, при формировании схемы электроснабжения на напряжении 10 кВ необходимо предварительно определить тип шкафов комплектных распределительных устройств, что для данного проекта равносильно исключению из каталога электрооборудования шкафов всех других типов.

Использование автоматизированной системы для оптимизации проектных решений возможно только при условии, что осуществлена формализация проектной задачи и имеется ее математическое описание, отражающее наиболее существенные взаимосвязи параметров оптимизируемой системы между собой.

В общем случае для каждого конкретного объекта можно разработать несколько математических моделей, отличающихся степенью адекватности реальной системе. В этой связи необходимо решение вопроса об условиях корректности создания математической модели системы электроснабжения изолированно от общей задачи оптимального проектирования генерального плана города, промышленного узла или предприятия с учетом оптимизации других инженерных сетей, транспортных коммуникаций и требований архитектурной эстетики. Необходимо отметить, что даже при принципиальной возможности создания математической модели такой комплексной задачи это неизбежно значительно увеличит ее размерность и приведет к модели большой системы, оптимизация которой в целом без декомпозиции на подсистемы современными вычислительными средствами неосуществима.



Чаще всего это касается линий электропередач, которые имеют большую протяженность и давно были построены. Несмотря на то, что старые линии находятся в удовлетворительном состоянии, это не означает, что их показания соответствуют современным требованиям ГОСТа. Одной из самых распространенных причин является низкое напряжение, передаваемое на трансформаторные подстанции, и слишком разветвленные распределительные сети. Также линию из строя могут вывести устаревшие деревянные опоры.

В процессе модернизации линии необходим индивидуальный подход к каждому объекту, в результате чего это приведет к уменьшению затрат на материалы и работы [1]. Основными видами работ при этом являются:

- 1) замена устаревших опор;
- 2) увеличение сечения провода;
- 3) изменение схемы электроснабжения.

Для повышения надежности электроснабжения необходимо:

- усовершенствование схемы распределительных сетей 10 кВ и линий электропередач;
- модернизация оборудования на РП-10 кВ, РУ-10 кВ, ТП, РУ-0,4 кВ;
- совершенствование устройств релейной защиты и автоматики [3];
- внедрение автоматики, повышение качества обслуживания;
- организация диспетчеризации и телемеханизации;
- резервирование по сторонам 10 и 0,4 кВ, соответственно;
- оптимизация распределительной сети, направленная на уменьшение потерь.

Также возможны различные способы оптимизации схем электроснабжения при модернизации и реконструкции сети. Необходимо принять во внимание тот факт, что модернизация касается объектов геометрически уже привязанных к месту, тогда как при создании новых сетей объекты еще не привязаны к местности. Это позволяет оптимизировать распределительные сети. Так, иногда необходимо упорядочить мощность трансформаторов для увеличения их эффективности, а в некоторых случаях и вовсе заменить устаревшие [2]. Дело в том, что со временем неизбежны отклонения реальных нагрузок от расчетных значений. Согласно техническим условиям перегруженные трансформаторы необходимо заменять на более мощные, с целью обеспечения более надежной и эффективной работы системы в целом. Замена перегруженных трансформаторов также уменьшит и потери.

### Список литературы

1. Идрисова А.Р., Роженцова Н.В., Мухаметзянова Ф.М. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. 2016. С. 97–100.
2. Булатов О.А., Фетисов Л.В. Повышение энергоэффективности распределения электрической энергии в сетях низкого напряжения с применением вольтодобавочных трансформаторов // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Кишинев, 2017. С. 13–17.
3. Дони Н.А., Иванов И.Ю., Иванова В.Р. Моделирование дифференциальной защиты линий электропередачи, работающей на базе векторных значений токов // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 1. С. 26–29.

## Секция 2. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 620.19

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Эльмира Муссаевна Баширова<sup>1</sup>, Ильвина Гамировна Хуснутдинова<sup>2</sup>,  
Раис Айратович Баширов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате

<sup>1</sup>bashirova-elmira@yandex.ru, <sup>2</sup>ilvina011@mail.ru, <sup>3</sup>Rois5@yandex.ru

Неразрушающие ультразвуковые методы контроля в настоящее время являются наиболее перспективными. Существует возможность выделить электромагнитно-акустический контроль в отдельный вид в [1]. Исследования в области звуковых волн позволят использовать старое оборудование в других целях, для которых оно ранее не было предназначено, получать результаты, которые ранее достигались другими методами неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, метод Симою, электромагнитно-акустический контроль, черный ящик, электромагнитно-акустический преобразователь, моделирование.

### PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD FOR THE CONTROL OF STEELS AND ALLOYS

E.M. Bashirova, I.G. Khusnutdinova, R.A. Bashirov

Non-destructive ultrasonic testing methods are currently the most promising. It is possible to isolate the electromagnetic-acoustic control in a separate form in [1]. Research in the field of sound waves will allow the use of old equipment for other purposes for which it was not previously intended, to obtain results that were previously obtained by other methods of non-destructive testing.

**Keywords:** non-destructive control, method by their, electromagnetic-acoustic control, black box, electromagnetic-acoustic converter, modeling.

В настоящее время согласно ГОСТ Р 56542-2015 неразрушающий контроль в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяют на следующие виды: акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический. В большинстве методов контроля для проведения диагностирования необходимо дорогостоящее оборудование. Практически во всех методах контроля необходимы

обученные специалисты для интерпретации полученных данных. В радиационных методах контроля, например, требуется работа высококвалифицированных специалистов и наличие высокотехнологичного оборудования в связи с высоким риском для жизни и здоровья людей, а также верной интерпретации полученных снимков [2].

Несмотря на многообразие видов контроля, все методы дополняют друг друга, предоставляя более детальную картину о природе вещества, структуре металла, наличие дефектов и т.п. Не существует единого метода, способного заменить все имеющиеся виды контроля.

Электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП) – это относительно новое направление в ультразвуковом контроле. Основное отличие этой технологии состоит в том, что ультразвуковая волна генерируется непосредственно в исследуемом объекте. В основе принципа действия ЭМАП лежит возбуждение и прием ультразвуковых волн путем воздействия на поверхность электропроводящего объекта переменного и постоянного магнитных полей. Индуктор ЭМАП, через который протекает импульс высокочастотного тока, создает в поверхностном слое металла вихревой ток. В результате совместного действия вихревого тока и поляризующего поля возникают силы Лоренца, обеспечивающие возбуждение ультразвуковых колебаний соответствующего типа. В зависимости от конструктивных параметров индуктора и ориентации поляризующего поля в процессе контроля возбуждаются сдвиговые SH-волны радиальной или линейной поляризации (индуктор овальной или прямоугольной формы) [3].

Кроме определения дефектов, представленных в ГОСТ Р 56542-2015, возможно усовершенствование электромагнитно-акустического метода для определения напряженно-деформированного состояния металлов и сплавов. Суть метода состоит в том, что исследуется график отраженного сигнала. Сигнал, полученный при сканировании, преобразуется в график отраженного сигнала. Данную теорию подтверждает использование ультразвукового метода при контроле регулируемой затяжки согласно [4].

Программное обеспечение для ПК «Нахождение передаточной функции» обрабатывает сигнал таким образом, что находит первый отраженный сигнал, который является наиболее информативным и простым в обнаружении; пример графика, получаемого после обработки сигнала работы электромагнитно-акустического преобразователя представлен на рис. 1. На рис. 1 первый отраженный сигнал расположен в промежутке от 4,5 до 7,5 мкс. Сигнал, полученный от ЭМА прибора, преобразуется

в передаточную функцию методом площадей (метод Симою). Знаменатель передаточной функции приравнивается к нулю, полученное уравнение решается любым известным методом. Числовые значения корней уравнения сравниваются с уже известными значениями, обрабатываются программой, и выводится усилие, с которым нагружен образец [5].

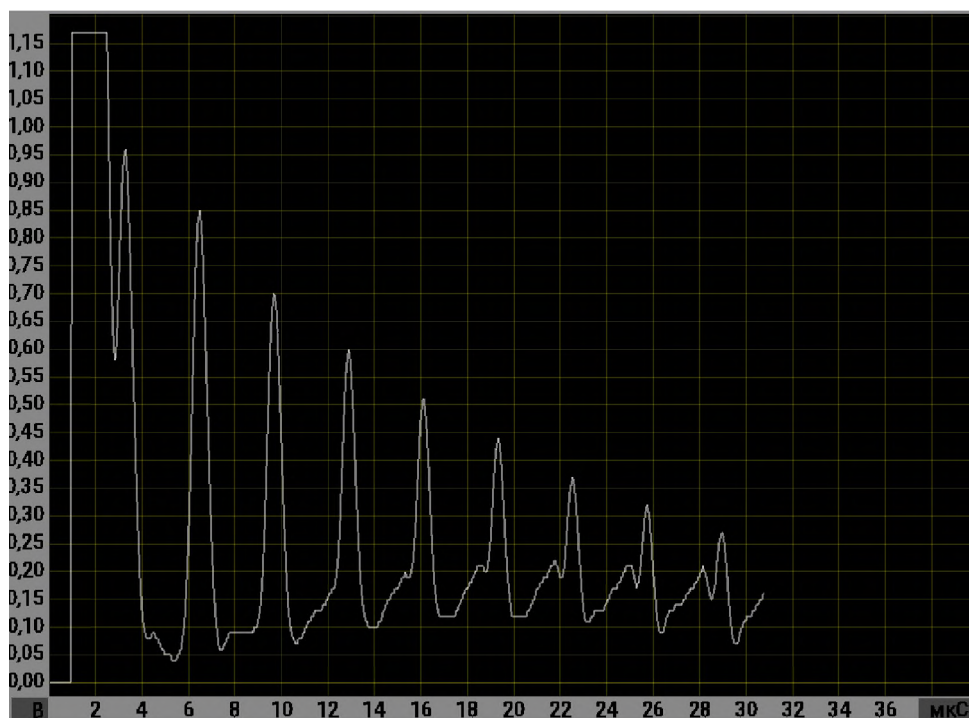


Рис. 1. Сигнал электромагнитно акустического преобразователя

После проведения ряда исследований по нагружению образца из Ст3 была выявлена зависимость между усилием, с которым нагружали образец, и корнями уравнения, зависимость представлена на рис. 2 [6].

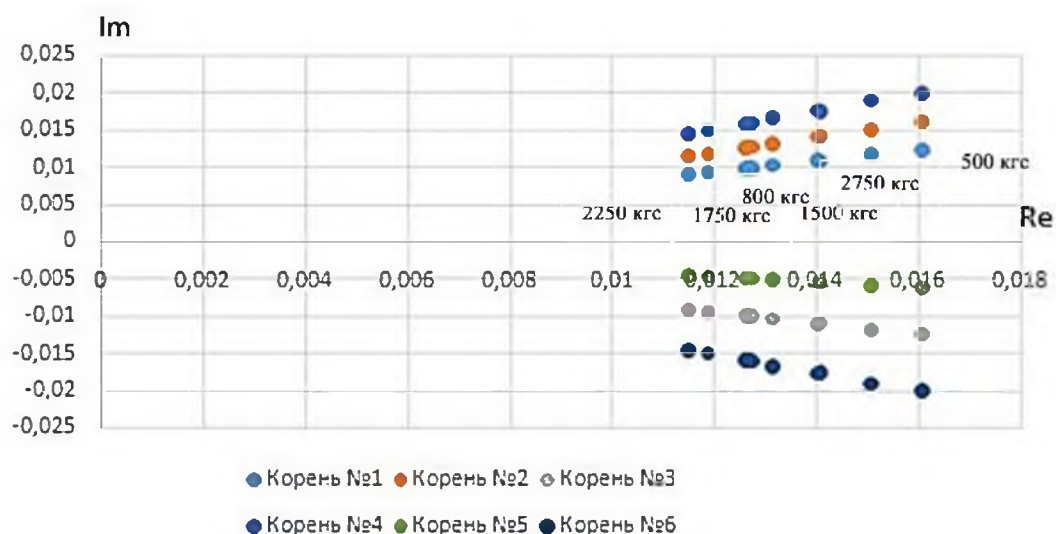


Рис. 2. Зависимость корней уравнения от величины нагружения

На рис. 2 по абсциссе отмечены действительные части корней уравнения, по ординате – мнимые части в связи с тем, что часть корней уравнения получаются комплексными. На графике представлены первые три пары корней [7].

Наибольшим недостатком является то, что необходимо провести множество исследований для каждой марки стали. Для ускорения исследований возможно использование специально обученной нейросети.

Электромагнитно-акустический метод применяют для определения наличия легирующих элементов в сплаве (определение марки стали), твердости, состава фаз (аустенит, перлит, мартенсит, троостит и т. д.), механических характеристик металлов и сплавов, остаточного ресурса при циклических нагрузках и напряженно-деформированного состояния объекта контроля.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 52542-2015. Контроль неразрушающий классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2015. С. 3–14.
2. Электромагнитный инденторный метод диагностики нефтегазового оборудования / В.С. Ишмухаметов [и др.] // Газовая промышленность. 2013. № S(700). С. 44–47.
3. Электромагнитно-акустическое преобразование // Октанта. Бесконтактные методы диагностики: сайт. URL: <http://oktanta-ndt.ru/ru/yelektromagnitno-akusticheskoe-preobr>.
4. ГОСТ 52889-2007. Акустический метод контроля усилия затяжки резьбовых соединений. М.: Стандартинформ, 2009. С. 5–10.
5. Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G. The use of electromagnetic-acoustic method for estimating the stress-strain state of the metallic elements of power equipment // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743. P. 463–467.
6. Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г., Усманов Д.Р. Оценка степени напряженно-деформированного состояния и уровня поврежденности конструктивных элементов электроэнергетического оборудования // Фёдоровские чтения – 2016: сб. матер. XLVI Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы. 2016. С. 235–236.
7. Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г. Разработка электромагнитно-акустического метода диагностики электроэнергетического оборудования // Наука. Технология. Производство – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа, 2014. С. 68–70.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НОВЕЙШИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Елена Олеговна Солдусова<sup>1</sup>, Артем Валерьевич Проничев<sup>2</sup>,  
Александр Андреевич Казанцев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
<sup>1</sup>esoldusova@inbox.ru, <sup>2</sup>teyoma@bk.ru, <sup>3</sup>kazancev@63.ru

В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов следующих инновационных решений: использование эффекта низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока с помощью аморфных ферромагнитных материалов и применение комбинированных конструкций силовых трансформаторов, сочетающих в себе перечисленные выше решения. Моделирование участка сети ГПП-1 г. Тольятти с заменой существующих масляных трансформаторов было проведено в ПК RastrWin3. Была оценена эффективность применения инновационных трансформаторов по сравнению с масляными. Были построены графики зависимости коэффициента полезного действия от коэффициента загрузки для различных видов трансформаторов. Результаты моделирования показали, что энергоэффективность инновационных трансформаторов значительно выше, чем энергоэффективность трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода. Удельные потери в сети 20 кВ ниже, чем в сети 10 кВ при использовании каждого из видов трансформаторов.

**Ключевые слова:** трансформатор, потери, энергосбережение, энергоэффективность, аморфные материалы, высокотемпературные сверхпроводниковые материалы.

## RESEARCH OF MODES IN THE USE OF THE NEWEST CONSTRUCTIONS OF TRANSFORMERS IN URBAN ELECTRIC NETWORKS

E.O. Soldusova, A.V. Pronichev, A.A. Kazancev

In modern conditions, the loss of electricity and power can be reduced by using the following innovative solutions in power transformer designs: the use of the superconductivity effect of low- and high-temperature, the introduction of new efficient methods for the formation of the main magnetic flux by means of amorphous ferromagnetic materials and the use of combined structures of power transformers combining the above the solution. Simulation of the site of the MSDS-1 network in Tolyatti with the replacement of existing oil transformers was carried out in the RastrWin3. The efficiency of using innovative transformers was compared with oil transformers. Graphs were constructed for the dependence of the coefficient of efficiency on the load factor for various types of transformers. The results of the simulation showed that the energy efficiency of innovative transformers is much higher than the energy efficiency of transformers with the traditional performance of the magnetic circuit. The specific losses in the network are 20 kV lower than in the 10 kV network when using each of the types of transformers.

**Keywords:** transformer, power saving, slips, energy efficiency, amorphous magnetic materials, high-temperature superconductor materials.

Потери электроэнергии  $\Delta W$  в электроустановках электрических систем и систем электроснабжения (ЭССЭ) при передаче, распределении и потреблении электроэнергии – это, с точки зрения закона сохранения энергии, неизбежные энергетические и экономические затраты на обеспечение физической сущности названных технологических процессов. Можно констатировать, что эти затраты, в частности, связанные с выделением тепла, за исключением его полезного использования, наносят вред, как самому электрооборудованию, так и окружающей среде [1, 2].

Поэтому несмотря на то, что проблема снижения суммарных потерь электрической мощности и энергии в электроэнергетике всегда была и есть в центре внимания эксплуатации, научных исследований, проектирования и конструирования новых электроустановок и процессов, можно констатировать непреходящую актуальность и необходимость поиска новых решений.

В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно существенно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов следующих инновационных решений:

- использование эффекта низко- и высокотемпературной сверхпроводимости для кардинального уменьшения нагрузочных потерь в обмотках силовых трансформаторов [3, 4];
- внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока силовых трансформаторов с помощью аморфных ферромагнитных материалов и перспективных бессердечниковых конструкций силовых трансформаторов для значительного (в 5–6 раз) снижения потерь холостого хода трансформатора [5, 6];
- применение комбинированной конструкции, сочетающей в себе использование аморфных магнитопроводов, и материалов, которые обладают эффектом высокотемпературной сверхпроводимости для изготовления обмоток силовых трансформаторов (АВТСТ) [1].

Силовой трансформатор является наиболее ответственной и дорогостоящей электроустановкой в ЭССЭ, а применение новых материалов увеличивает его стоимость. Поэтому необходимо, чтобы этот элемент сети функционировал с высокой надёжностью и стабильностью [6].

Для фрагмента сети ГПП-1 г. Тольятти на напряжение 10 и 20 кВ, представленного на рис. 1, была смоделирована замена традиционных масляных трансформаторов (ТМ) на всех трансформаторных подстанциях с учетом реальных нагрузок на АФТ, ВТСТ и АВТСТ. Расчеты потерь электроэнергии и мощности были выполнены в программном комплексе RastrWin3. Анализировались потери во всей сети в целом, без расчета удельных потерь на одну трансформаторную подстанцию.

Была оценена эффективность применения АФТ, ВТСТ и АВТСТ по сравнению с традиционными масляными трансформаторами путем определения суммарных потерь в линиях электропередачи и в трансформаторах схемы, представленной на рис. 1.





Графически результаты расчетов суммарных потерь для всех видов трансформаторов в сетях 10 и 20 кВ представлены на рис. 2.

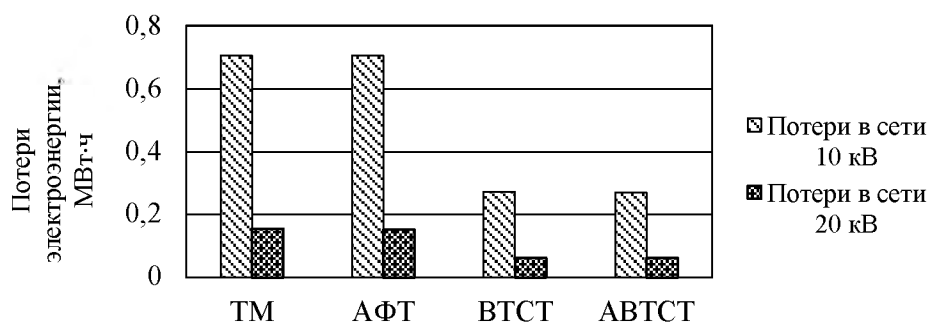


Рис. 2. Результаты расчетов суммарных потерь в сетях 10 и 20 кВ при использовании различных видов трансформаторов

Далее в работе были построены графики зависимости коэффициента полезного действия (КПД) от  $k_3$  для ТМ-400/10 и АФТ, ВТСТ, АВТСТ трансформаторов с той же номинальной мощностью и напряжением. Полученные результаты показаны на рис. 3. и приведены в таблице.

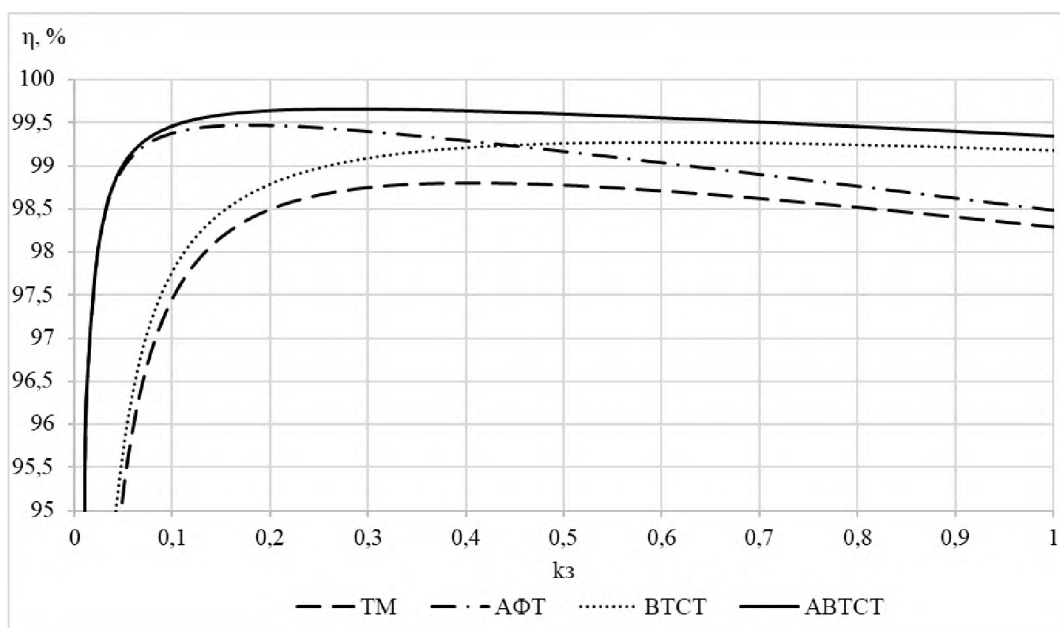


Рис. 3. Графики зависимости КПД от  $k_3$

Максимальные значения КПД трансформаторов при соответствующих значениях  $k_3$

| Тип трансформатора | $\eta_{\max}$ , % | $k_{3\max}$ |
|--------------------|-------------------|-------------|
| ТМ                 | 98,805            | 0,4         |
| АФТ                | 99,470            | 0,18        |
| ВТСТ               | 99,273            | 0,61        |
| АВТСТ              | 99,652            | 0,28        |

Из результатов моделирования видно, что энергоэффективность инновационных трансформаторов значительно выше, чем энергоэффективность трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода. Также можно отметить, что удельные потери в сети 20 кВ ниже, чем в сети 10 кВ при использовании каждого из видов трансформаторов.

На основании построенных графиков можно сделать вывод, что у АФТ и ТМ с ростом  $k_3$  коэффициент полезного действия снижается быстрее, чем у ВТСТ и АВТСТ, ввиду больших потерь короткого замыкания. Действительно, у трансформаторов с меньшими потерями холостого хода, таких как АФТ и АВТСТ, наибольший КПД достигается при меньшем значении  $k_3$ , по сравнению с традиционными масляными трансформаторами. КПД таких трансформаторов при коэффициенте загрузки, соответствующему максимальному значению КПД ТМ, значительно выше масляного. У ВТСТ трансформатора наибольший КПД соответствует большему  $k_3$  по сравнению с другими рассмотренными видами трансформаторов.

Таким образом, введение в эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов, высокотемпературных сверхпроводниковых трансформаторов и их комбинированной конструкции является одним из наиболее перспективных путей снижения технических потерь энергосистем. Производственные способности российских производителей в изготовлении трансформаторов АФТ развиваются быстрым темпом и способны обеспечить спрос на данный тип оборудования.

### Список литературы

1. Савинцев Ю.М. Анализ состояния производства в РФ силовых масляных СТ I-III габаритов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 1. С. 43–53.
2. Александров Н.В. Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 2014.
3. Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений / В.Г. Гольдштейн [и др.] // Вестник СамГТУ. 2013. № 4(40). С. 149–157. (Сер. «Технические науки»).
4. Кузнецов Д.В., Гольдштейн В.Г. Совершенствование концепции и методов организации энергоснабжения мегаполисов // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 59–65.

5. Манусов В.З., Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Известия ТПУ. 2013. № 4. С. 100–105.

6. Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers / A. Berger [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, 234. 2010. С.7–13.

УДК 621.316

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО ВКЛАДА МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА В НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Евгения Андреевна Булычева<sup>1</sup>, Алексей Игоревич Куликов<sup>2</sup>,  
Сергей Александрович Янченко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

<sup>1</sup>BulychevaYA@mpei.ru, <sup>2</sup>KulikovAI@mpei.ru, <sup>3</sup>yanchenko\_sa@mail.ru

Существует большое количество методов определения фактического вклада присоединения в несинусоидальность напряжения сети. В данной статье методы разделены на две группы, механизмы расчета которых рассмотрены на примере многоквартирного дома.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, гармоники, нелинейная нагрузка, гармоническое сопротивление, напряжение искажения, корреляционный анализ.

## DETERMINATION OF THE ACTUAL CONTRIBUTION OF A MULTIPLE HOUSE TO THE NON-SINUSOIDAL VOLTAGE OF A NETWORK

E.A. Bulycheva, A.I. Kulikov, S.A. Yanchenko

There are a lot of method for determination the actual contribution of the connection to the non-sinusoidal voltage of the network. In this article, the methods are divided into two groups, the calculation mechanisms of which are discussed on the example of an apartment building.

**Keywords:** power quality, harmonics, non-linear load, harmonic impedance, distortion voltage, correlation analysis.

### Введение

В настоящее время в связи с увеличением доли нелинейных нагрузок в бытовом электропотреблении (зарядные устройства, блоки электропитания бытовой техники и пр.) наблюдается тенденция роста высших гармоник (ВГ) в сети 0,4 кВ. Несмотря на малое значение единичной потребляемой мощности бытовых электроприемников, при одновременном их использовании возникает необходимость минимизировать ВГ токов

и напряжений. Важно оценивать степень влияния на несинусоидальность напряжения со стороны потребителя и системы, когда источники искажений находятся на обеих сторонах, и неочевиден доминирующий источник.

В статье рассмотрены две группы методов определения фактического вклада (ФВ) в несинусоидальность напряжения со стороны системы и потребителя: по напряжениям искажений [1–3] и на основе корреляционного анализа данных [4–6]. Особенностью первой группы является определение сопротивлений системы и потребителя на основе приращений ВГ напряжения и тока. Вторая группа основана на корреляционном анализе связи между током и напряжением ВГ.

Использование методов для определения ФВ демонстрировалось на примере многоквартирного дома. Измерения проводились с помощью измерителя показателей качества электрической энергии «Ресурс» в течение суток с интервалом осреднения 3 с. Обработка результатов измерений реализована с помощью Matlab на примере 5-й гармоники, равной 1,913 В.

Метод определения ФВ по напряжениям искажений реализуется с помощью принципа наложения, отражающий двухсторонние отношения между различными подсистемами электрической сети. В [1] в схеме замещения (СЗ) энергосистема и потребитель представляются в виде двухполюсников с эквивалентными сопротивлениями  $\underline{Z}_C$ ,  $\underline{Z}_П$  и источниками тока ВГ  $\underline{J}_C$ ,  $\underline{J}_П$  (рис. 1). Параметры СЗ рассчитываются по измеренным величинам тока  $I$  и напряжения  $U$  искажения.

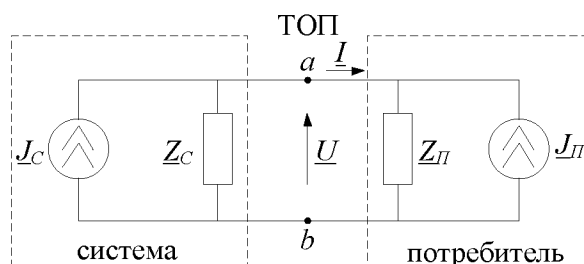


Рис. 1. Схема замещения двух подсистем с источниками искажения

На основе представленной СЗ ФВ определяется по результатам непрерывных суточных измерений с заданным шагом. По сформированным массивам приращений  $n$ -й гармонической составляющей напряжений и токов определится массив комплексного сопротивления  $\underline{Z}$ :

$$\underline{Z} = \frac{\Delta \underline{U}_{(n)}}{\Delta \underline{I}_{(n)}}. \quad (1)$$

Сопротивление  $\underline{Z}$  затем распределяется между сетью ( $\underline{Z}_C$ ) и потребителем ( $\underline{Z}_П$ ) согласно методике, изложенной в [1]. Далее формируется массив ФВ в несинусоидальность напряжения со стороны системы и потребителя по выражениям:

$$\underline{U}_C = \left( \underline{U}_{(n)} + \underline{Z}_C \underline{I}_{(n)} \right) \frac{\underline{Z}_П}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_П}; \quad (2)$$

$$\underline{U}_П = \left( \underline{U}_{(n)} - \underline{Z}_П \underline{I}_{(n)} \right) \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_П}, \quad (3)$$

где  $\underline{U}_{(n)}$  и  $\underline{I}_{(n)}$  – массивы измеренных напряжений и токов в ТОП;  $\underline{Z}_C$  и  $\underline{Z}_П$  – массивы средних получасовых значений входных сопротивлений каждой подсистемы.

К методам обнаружения источников ВГ относится метод корреляционного анализа данных [4], использующий изменения нагрузки для определения амплитуды гармонического сопротивления. Метод включает в себя два этапа. На первом этапе по СЗ, в которой потребитель представляется источником гармонического тока  $I_П$ , а система – источником гармонического напряжения  $U_C$  и входным сопротивлением  $Z_C$  (рис. 2, а), определяется входное сопротивление системы  $Z_C$ , к которой подключается исследуемый потребитель.

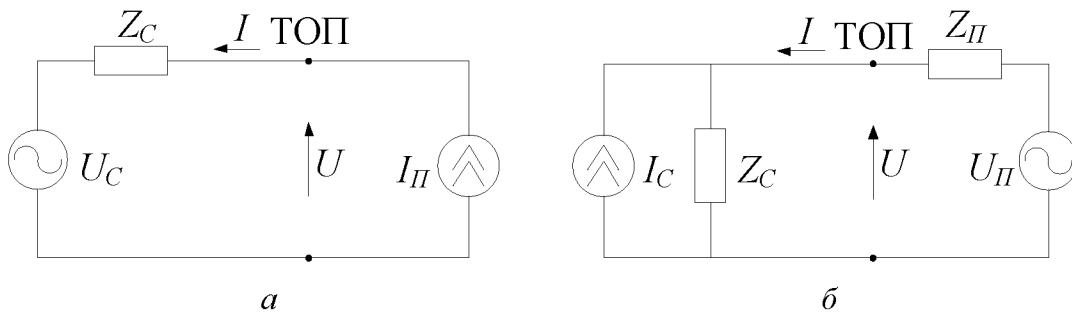


Рис. 2. Схемы замещения для определения ФВ методом корреляционного анализа данных

По измеренным гармоническим значениям тока  $I$  и напряжения искажения  $U$  в ТОП строится корреляционная зависимость, описываемая линейным уравнением:

$$U = f(I \cos \theta_h) = kx + b = |Z_C| \times \{ |I| \cos(\theta_h) \} + |U| \cos(\phi_h), \quad (4)$$

где  $\theta_h = \alpha_h - \beta_h$ ;  $\alpha_h$  – фазовый угол гармонического сопротивления системы, принимается равным отношению  $X/P$  питающего трансформатора;  $\beta_h$  – фазовый угол между  $i$ -м измеренным гармоническим током и напряжением.

Из графика  $U = f(I \cos \theta_h)$  находятся значения сопротивления системы  $|Z_C|$  и фонового гармонического напряжения  $|U| \cos(\varphi_h)$ .

На втором этапе осуществляется оценка ФВ потребителя в несинусоидальность напряжения по СЗ, в которой потребитель представлен источником гармонического напряжения  $U_{\Pi}$  и сопротивлением  $Z_{\Pi}$ , а система – источником гармонического тока  $I_C$  и входным сопротивлением  $Z_C$  (рис. 2, б).

Значение тока  $I_C$  рассчитывается по измеренным значениям  $U$ ,  $I$  и по рассчитанному на первом этапе сопротивлению системы  $Z_C$ :

$$I_C = \frac{U}{Z_C} - I. \quad (5)$$

Далее по измеренному напряжению  $U$  и рассчитанному току  $I$  строится корреляционная зависимость, линия тренда которой описывается уравнением:

$$U = f(I_C) = k \cdot x + b = \frac{Z_{\Pi} Z_C}{Z_{\Pi} + Z_C} I_C + \frac{Z_C}{Z_{\Pi} + Z_C} U_{\Pi}. \quad (6)$$

Значения  $k = \frac{Z_{\Pi} Z_C}{Z_{\Pi} + Z_C}$  и  $b = \frac{Z_C}{Z_{\Pi} + Z_C} U_{\Pi}$  определяются непосредственно из графика линии тренда.

Используя данный метод, ФВ в уровень несинусоидальности со стороны потребителя и сети определяется следующим образом:

$$U_{\text{ФВ},\Pi}(\%) = \frac{|Z_C / (Z_{\Pi} + Z_C) U_{\Pi}|}{U} \cdot 100\%; \quad (7)$$

$$U_{\text{ФВ},C}(\%) = 100 - U_{\text{ФВ},\Pi}(\%). \quad (8)$$

Рассмотрим процесс расчета ФВ на примере 5-й гармоники. Суточные изменения тока и напряжения 5-й ВГ приведены на рис. 3. За 24 часа формируется два массива входных сопротивлений, каждый из которых включает 48 элементов (рис. 4). После процедуры формирования входных сопротивлений  $Z_C$  и  $Z_{\Pi}$ , средние значение модулей которых составляют  $Z_C = 0,163$  Ом и  $Z_{\Pi} = 6,852$  Ом, по формулам (2) и (3) определяется массив ФВ системы и потребителя на каждом интервале времени (рис. 5), средние значения модулей которых составляют  $U_{\text{ФВ},C} = 0,918$  В и  $U_{\text{ФВ},\Pi} = 1,252$  В.

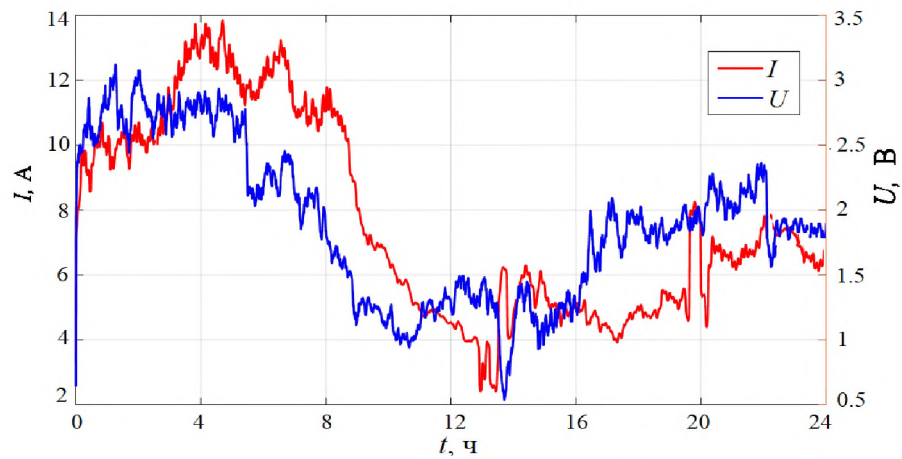


Рис. 3. Суточное изменение тока и напряжения 5-й ВГ

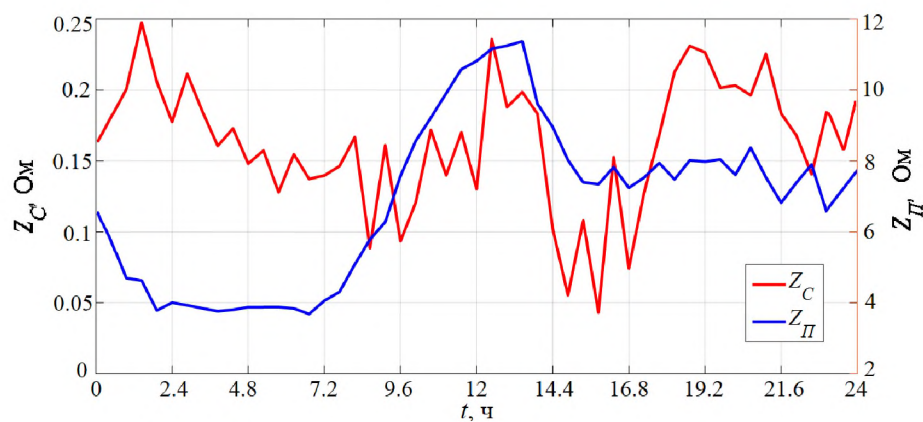


Рис. 4. Сопротивления системы и потребителя

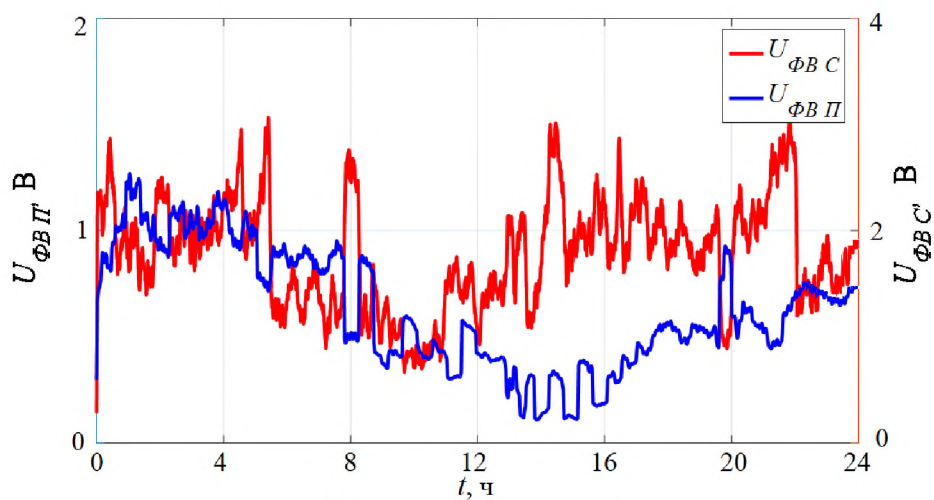


Рис. 5. ФВ системы и потребителя в течение суток

Рассмотрим механизм расчета на примере 5-й гармоники. Фазовый угол гармонического сопротивления системы составляет  $\alpha = 2,512$ . На первом этапе в Matlab строится корреляционная зависимость (рис. 6), и определяется входное сопротивление системы, равное  $|Z_C| = 0,147$  Ом.



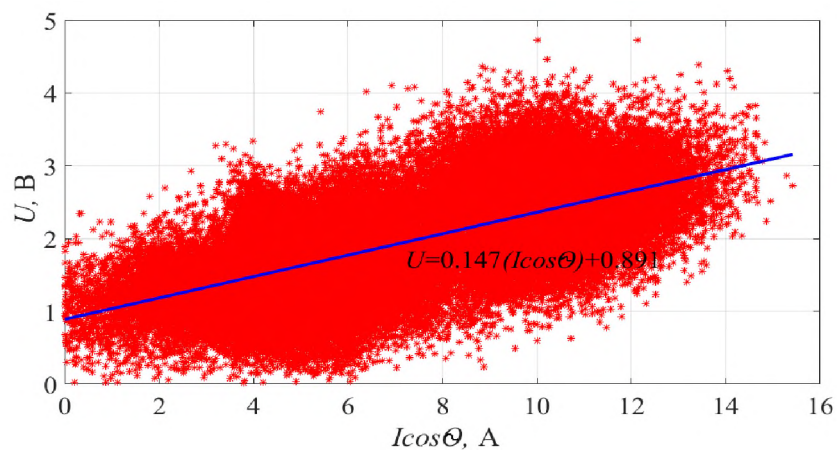


Рис. 6. Корреляционная зависимость и линии тренда для определения входного сопротивления системы для 5 гармоники

На втором этапе строится корреляционная зависимость между  $U$  и  $I_C$  (рис. 7), и определяется ФВ потребителя, равный  $U_{ФВ П} = 1,022$  В. ФВ со стороны системы определяется по формуле (8) и составляет  $U_{ФВ С} = 0,891$  В.

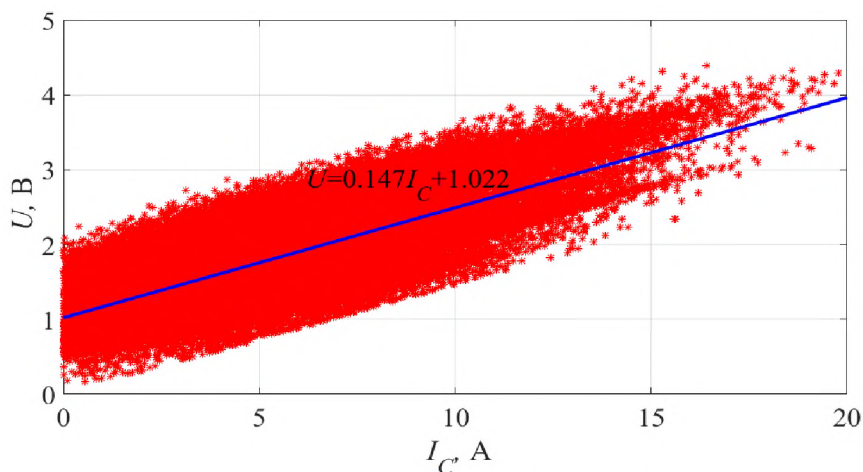


Рис. 7. Корреляционная зависимость и линия тренда для определения ФВ потребителя для 5 гармоники

По результатам непрерывных суточных измерений с шагом 3 секунды определен фактический вклад со стороны системы и потребителя отечественным и зарубежным методами (таблица).

Таблица

Результаты расчета ФВ со стороны системы и потребителя

| Параметр               | Метод определения ФВ по напряжениям искажений | Метод анализа данных |
|------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| Сопротивление сети, Ом | 0,163                                         | 0,147                |
| ФВ системы, В          | 0,918                                         | 0,891                |
| ФВ потребителя, В      | 1,252                                         | 1,022                |

Из таблицы видно, что сопротивление сети и ФВ многоквартирного дома в несинусоидальность напряжения сети 0,4 кВ, полученные двумя методами, примерно одинаковые, что косвенно подтверждает адекватность проведенных исследований.

Для реализации метода определения ФВ по напряжениям искажений необходимы суточные показания напряжения и тока на ответвлении. Для работоспособности метода корреляционного анализа данных необходимо помимо этого знать тип и мощность питающего трансформатора для определения фазового угла гармонического сопротивления системы.

Метод корреляционного анализа данных обладает более простым механизмом расчета, не требующим объемных вычислений, однако метод определения ФВ по напряжениям искажений дает более детальное представление о ФВ в несинусоидальность напряжения в каждый момент времени. Таким образом, выбор того или иного метода зависит от поставленной цели и задач определения ФВ.

### Список литературы

1. Тульский В.Н. Развитие методики определения ФВ при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения: дис.... канд. техн. наук. М., 2004. 134 с.
2. Гамазин С.И., Петрович В.А. Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии // Промышленная энергетика. 2003. № 1. С. 32–38.
3. Васильев Е. И. Определение фактического вклада потребителей и системы в несинусоидальность напряжения на основе активных экспериментов: дис. канд. техн. наук. М., 2008. 178 с.
4. Mehdi, Shojaie, Hosein Mokhtari. A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data correlation analysis // IET Generation, Transmission and Distribution. 2014. Vol. 8. P. 142–150.
5. Xu W., Bahry R., Mazin H.E., Tayjasanant T. A method to determine the harmonic contributions of multiple loads // Proc. IEEE PES General Meeting. Calgary, 2009. P. 1–6.
6. Yin Z., Sun Y., Yu T. New methods exploration for harmonic source identification technologies // Proc. 4th Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai. Shandong, 2011. P. 399–402.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ CO<sub>2</sub> ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Виталий Дмитриевич Сандаков

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

vitalysandakov@mail.ru

В статье рассмотрены факторы, влияющие на качество воздуха в помещении, предложен метод повышения эффективности очистки воздушной среды помещений, проведено моделирование концентраций загрязняющих веществ, получены экспериментальные данные по очистке воздушной среды от CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** концентрация углекислого газа, моделирование концентраций загрязняющих веществ, кратность воздухообмена, электрофизические и разрядные характеристики, номограмм.

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL ENERGY CHARACTERISTICS OF THE AIR CLEANING PROCESS FROM CO<sub>2</sub> OF CLOSED PREMISES

V.D. Sandakov

In the article discusses the factors influencing the quality of indoor air, created the method of increasing the efficiency of clean indoor air, modeled pollutant concentrations is carried out, obtained by experimental data of clean the air from CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** concentration of carbon dioxide, modeling of pollutant concentrations, air exchange rate, electrophysical and discharge characteristics, nomogram.

В ранее опубликованных работах [1, 7] были рассмотрены электрофизические методы и установки очистки экологически вредных газов замкнутых помещений, показавшие свою актуальность и эффективность.

Качество воздуха замкнутых помещений зависит от химического состава наружного воздуха; количества и интенсивности источников загрязнений в помещении, кратности воздухообмена и т. п.

Важной проблемой воздушной среды замкнутых помещений, в которых продолжительное время находятся люди, является повышенная концентрация диоксида углерода (CO<sub>2</sub>). При концентрациях CO<sub>2</sub>, равных 800–1200 ppm, появляется ряд негативных признаков, таких как снижение внимания, сонливость и усталость, а при превышении концентрации CO<sub>2</sub> свыше 1200 ppm, возникает полная потеря работоспособности. Диоксид углерода часто превышает концентрацию в 1200 ppm при большом количестве людей в замкнутых помещениях, таких как конференц-залы, спортзалы, офисы, аудиторные помещения и т. д.

Моделирование концентрации  $\text{CO}_2$  в помещении основано на уравнении Селиверстова [8], учитывающее величину воздухообмена помещения. При учете вместо величины воздухообмена его кратность, что отражает более полную картину, получаем уравнение:

$$C = \frac{C_{\text{уд}}}{V_{\text{уд}}k} [1 - e^{-k}] + C_{\text{пр}},$$

где  $k$  – кратность воздухообмена;  $C_{\text{уд}}$  – концентрация  $\text{CO}_2$ , выделяемая одним человеком в час;  $V_{\text{уд}}$  – удельный объем воздуха на одного человека.

Согласно (ГОСТ 30494-96) концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе среднего промышленного города вне помещений составляет 300–500 ppm, при расчете принято, что начальная концентрация  $\text{CO}_2$  равна 400 ppm.

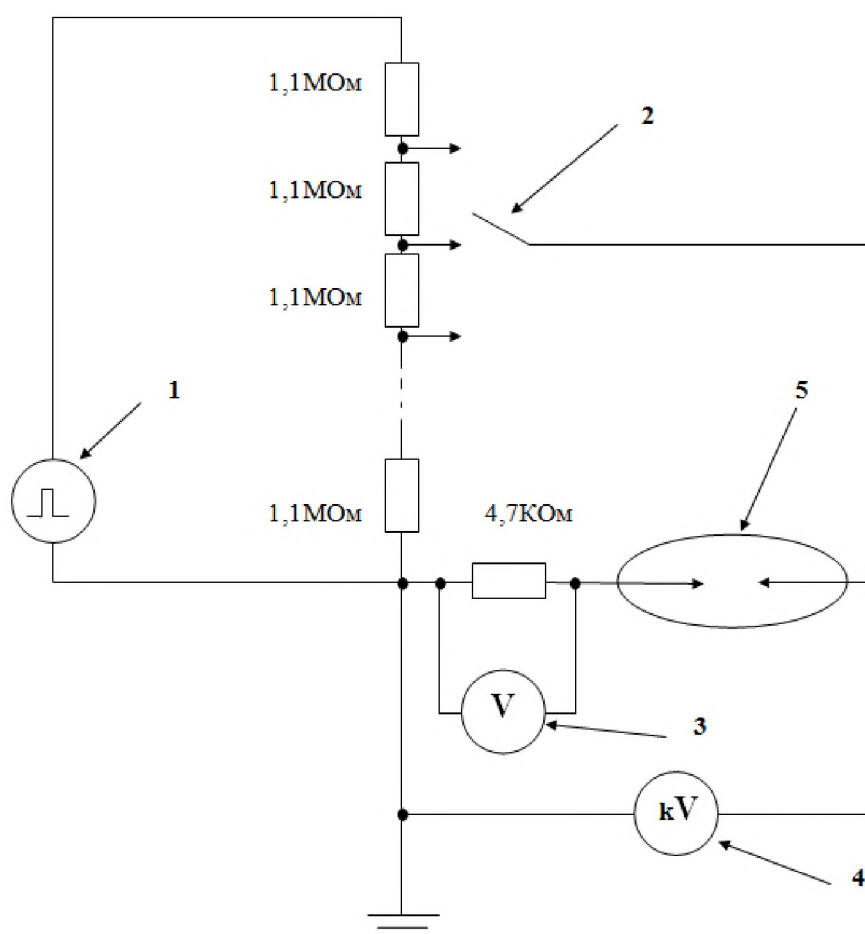


Рис. 1. Электрическая часть схемы экспериментальной очистительной установки:  
 1 – импульсный источник питания; 2 – делитель напряжения; 3 – осциллограф;  
 4 – киловольтметр; 5 – реакционная камера

По произведенным расчетам (рис. 2) видно, что концентрация  $\text{CO}_2$  в замкнутых помещениях часто превышает приемлемый уровень в 600 ppm.

В высоковольтной лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ» была разработана экспериментальная установка для исследования процесса очистки воздушной среды помещений от  $\text{CO}_2$  при различных кратностях воздухообмена.

Экспериментальная установка содержит делитель напряжения, для получения ступенчатой системы регулирования вольт-амперной характеристики и, как следствие, величины энерговклада (рис. 1).

Совместив полученные экспериментальные данные энерговклада для процесса очистки воздушной среды от  $\text{CO}_2$  с теоретическими графиками концентраций  $\text{CO}_2$  в зависимости от удельного объема замкнутого помещения для различных кратностей воздухообмена, построена номограмма (рис. 2) с погрешностью в 5 %.

Полученная номограмма показывает количество энергии, которое необходимо для процесса очистки воздуха от  $\text{CO}_2$  при изменении удельного объема помещения для различных кратностей воздухообмена.

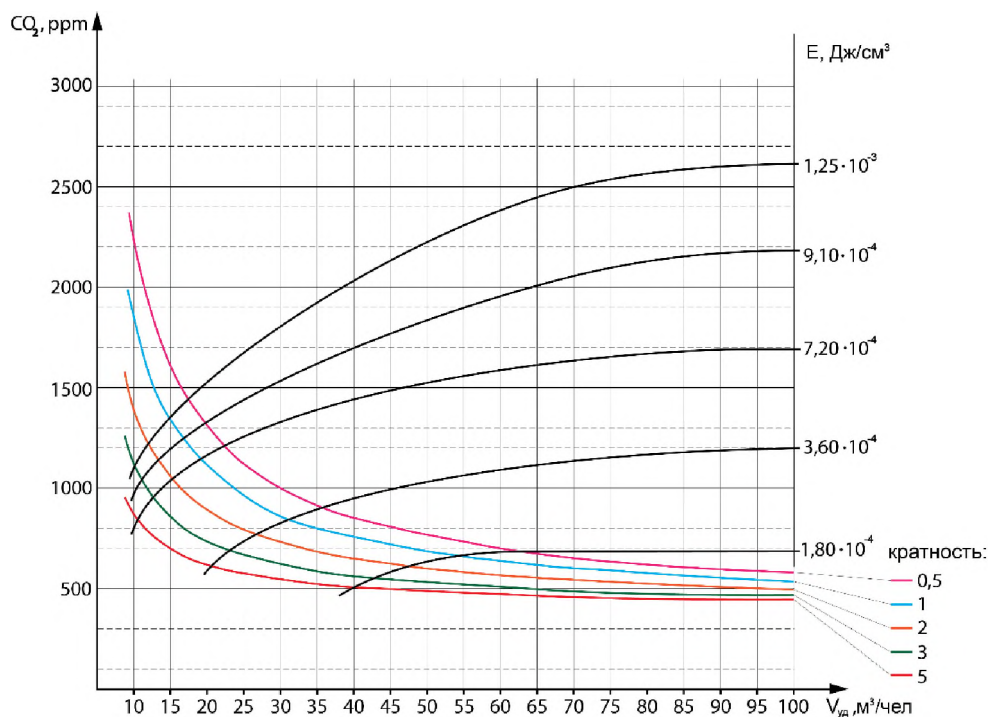


Рис. 2. Номограмма зависимостей концентрации  $\text{CO}_2$  от энерговклада и удельного объема помещения для различных кратностей воздухообмена

Используя полученную номограмму, с помощью средств автоматики и датчиков контроля  $\text{CO}_2$  замкнутого помещения появляется возможность регулирования энергозатрат установки очистки газовых сред при изменении удельного объема помещения и, соответственно, концентрации  $\text{CO}_2$ , задавшись начальными параметрами, такими как кратность воздухообмена и начальная концентрация  $\text{CO}_2$ .

## Список литературы

1. Nair S.A. Corona plasma for tar removal // Proefschrift, Eindhoven, 2004. P. 7–21.
2. Swart P.H., Uys R. All solid state Pulser Design for a Pulsed Corona Flue Gas Pollution Mitigation System // Proc. ICESP 9 Conf – Kruger Gate. South Africa, 2004. P. 4–43.
3. Особенности очистки газовых выбросов с использованием монокристаллических электродов / В.Д. Сандаков [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 20. С. 269.
4. Matzing H., Penetrante B.M., Schultheis S.E. Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control // NATO ASI Series. 1993. Vol. G34. P. 59–64.
5. Способ очистки газообразных выбросов от оксидов азота: пат. 2403955 Рос. Федерация № 2009120127/05; заявл. 28.05.09; опубл. 20.11.10, Бюл. № 32.
6. Способ очистки, деструкции и конверсии газа: пат. 2486719 Рос. Федерация № 2011153441/07; заявл. 27.12.11; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18.
7. Способ облучения электронными пучками: пат. 95108878 Рос. Федерация 95108878/25; заявл. 02.06.95; опубл. 20.06.97.
8. Селиверстов А. Н. Вентиляция фабрично-заводских помещений. М.: Госстройиздат, 1934. Т. 1. С. 29.
9. Проблемы утилизации и переработки органических отходов сельского хозяйства / И.Х. Гайфуллин [и др.] // Agricultural machinery 2018 VI International scientific congress. 2018. Burgas Bulgaria.

УДК 628.9

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ

Нафис Исламович Хабибрахманов<sup>1</sup>, Наталья Вячеславовна Денисова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань  
<sup>1</sup>062012ep@gmail.com

Потребление электроэнергии осветительными приборами и установками в зависимости от отрасли промышленности от общего расхода составляет от 5 до 30 %, а иногда и более. По этой причине повышение энергетической эффективности системы освещения, в контексте энергосберегающих технологий в электроэнергетике, является актуальной задачей.

**Ключевые слова:** системы освещения, управление освещением, повышение эффективности, светодиодные светильники.

# IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF LIGHTING SYSTEMS

N.I. Khabibrakhmanov, N.V. Denisova

Electricity consumption of lighting devices and installations, depending on the industry, from the total consumption is from 5 to 30 % and sometimes more. For this reason, increasing the energy efficiency of the lighting system, in the context of energy-saving technologies in the power industry, is an urgent task.

**Keywords:** lighting systems, lighting control, efficiency improvement, LED lamps.

Ежегодные темпы роста цен на электрическую энергию для конечного потребителя в России за последние пять лет составляли от 12 до 23 %. Вследствие такой политики энергетических компаний и государства цены на электроэнергию выросли почти в 2,5 раза. В этих условиях всё большее число потребителей задумывается о существенном повышении энергетической эффективности собственных электроустановок.

Интеграция энергосберегающих светильников в систему управления освещением (АСУО) позволяет получить дополнительное уменьшение энергопотребления на 30–50 %, что в свою очередь даёт существенную экономию финансовых средств. Кроме того, благодаря таким технологиям возможны удалённый мониторинг и управление теперь уже интеллектуальной системой, что значительно снижает расходы на техническое обслуживание, а также сокращает время, требующееся для проведения ремонтных работ, что не менее важно, так как безусловно действующая система освещения повышает безопасность деятельности людей.

Внедрение подобных систем оправданно практически повсеместно, будь то индивидуальный жилой дом или система уличного освещения мегаполиса, торгово-офисный центр или производственная площадка крупного предприятия. В последнее время интеллектуальные системы освещения всё чаще внедряются промышленными предприятиями. Среди организаций, успешно внедривших АСУО, можно выделить следующие: Электрохимический завод и Сибирский химический комбинат, входящие в корпорацию «Росатом», некоторые электростанции, входящие в объединённые и территориальные генерирующие компании.

Основными направлениями по энергосбережению в установках внутреннего освещения являются:

- применение энергоэффективных осветительных устройств;
- автоматизация управления установок внутреннего освещения.

По первому направлению в настоящее время нашли широкое применение светодиодные технологии освещения, благодаря эффективному расходу электроэнергии и простоте конструкции.

Основными достоинствами светодиодных источников света являются:

- средний срок службы светодиодных систем в несколько раз выше по сравнению с массовыми лампами;
- экономично используют энергию по сравнению с предшествующими поколениями электрических источников света;
- высокая надежность, механическая прочность, виброустойчивость;
- с течением времени световой поток и сила света практически не претерпевают изменений;
- являются экологически чистыми и безопасными лампами.

Основной недостаток – высокая цена. Отношение цена/люмен у сверхъярких светодиодов больше, чем у традиционных ламп.

По второму направлению энергосбережения в установках внутреннего освещения необходимо отметить следующее. Автоматизированные системы управления освещением (АСУО) позволяют осуществить: экономию электроэнергии, улучшить комфортность освещения, увеличить срок службы источников света. Дополнительно АСУО могут взять на себя функции мониторинга, диагностики осветительных установок и устранения неисправностей за счет резервных осветительных приборов.

Все существующие системы автоматизированного управления внутренним освещением можно классифицировать по нескольким критериям:

1. Регулирование освещения по датчику освещения. Управление освещением осуществляется посредством информации, поступающей с датчика освещенности, измеряющего уровень освещенности помещения.
2. Регулирование освещения по датчику движения. Включение источников освещения осуществляется только при движении людей в помещении.
3. Интеллектуальные системы управления.

Основными преимуществами АСУО, разработанной на основе методов искусственного интеллекта, являются:

- диммирование освещения, что позволяет плавно менять уровень светового потока осветительных устройств, а соответственно, экономить электроэнергию;
- централизованное управление осветительными установками;
- учет времени суток и календарного дня года.



Структурная схема АСУО представлена на рис. 1.

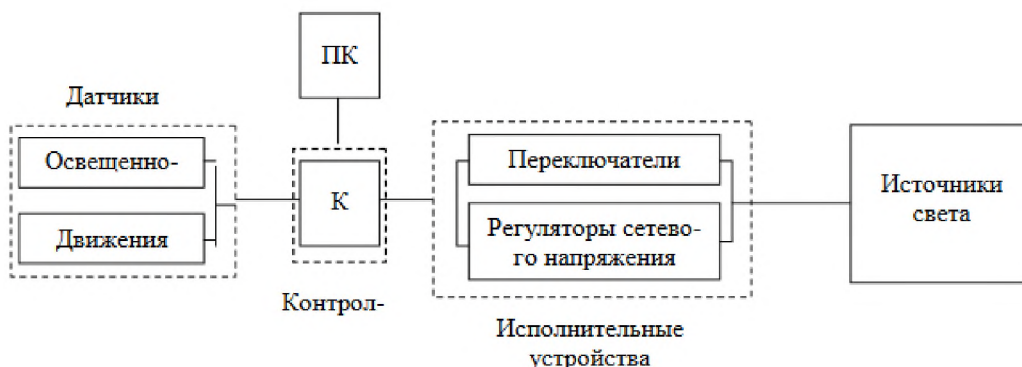


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления внутренним освещением

Проведенный анализ показал, что в настоящее время основными инновационными направлениями по энергосбережению внутреннего освещения являются:

- замена люминесцентных ламп, ДРЛ и ламп накаливания на светодиодные источники;
- разработка систем автоматизированного управления, основанных на методах искусственного интеллекта.

СОУ бывают аналоговые и цифровые. К аналоговым системам управления относятся:

- 0-10V DC;
- AMX192 (часто называемый AMX; стандарт США);
- D54 (европейский стандарт).

Примерами цифровых СУО являются:

- digital addressable lighting interface (DALI);
- digital serial interface (DSI);
- digital multiplex 512 (DMX512);
- KNX

DALI – это цифровой адресный интерфейс освещения. Сеть DALI состоит из контроллера и одного или нескольких балластов люминесцентных ламп либо драйверов светодиодов, которые имеют соответствующие интерфейсы [1]. Данные передаются с использованием манчестерского кодирования и имеют высокое отношение сигнал/шум, которое обеспечивает надежную связь при наличии значительных электрических шумов. В состав рассматриваемой системы входят датчики движения, присутствия и освещенности, благодаря чему возможно программирование различных световых сценариев [2].

Система DSI – это цифровой последовательный интерфейс, предназначенный для управления освещением в зданиях. DSI также использует цифровую связь в управлении освещением и является предшественником DALI. Технология использует один байт, чтобы сообщить уровень освещения с шагом от 0 до 255. Данная система также, как и DALI, основана на протоколе с кодировкой Манчестера и скоростью передачи 1200 бит/с. Однако DSI, в отличие от DALI, можно управлять 200 устройствами, но при этом усложняется их система контроля [3].

Система DMX512 – это стандарт для цифровых сетей связи, которые применяются для управления освещением сцены и спецэффектами. DMX512 позволяет связывать контроллеры (такие как консоль освещения) с диммерами и устройствами специальных эффектов (например, дым машина). Сеть DMX512 состоит из одного контроллера, который является центральным в сети, а также одного или нескольких управляемых устройств. Данный стандарт позволяет управлять 512 каналами связи. Для передачи данных применяется экранированная шина с двумя проводами и разъемом XLR3 [4].

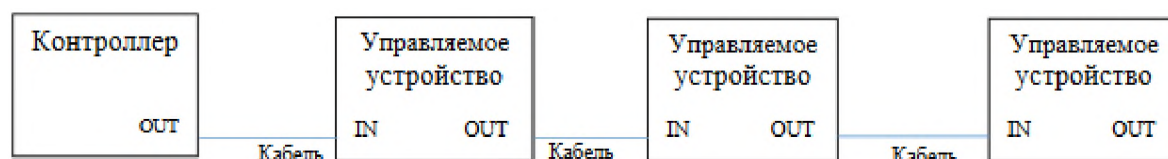


Рис. 2. Устройство сети DMX512

Система DMX512 получила широкое распространение и является одним из основных стандартов для многих светотехнических устройств. Данный стандарт применяется для управления сценическим освещением, нетеатральным внутренним освещением зданий, архитектурным освещением, а также при подсветке рекламных щитов.

Система KNX (EN 50090: ISO / IEC 14543) является стандартизированным протоколом сетевой связи на основе OSI (Open Systems Interconnection model) для автоматизации освещения. KNX включает в себя следующие стандарты: European Home Systems Protocol (EHS). BatiBUS и the European Installation Bus (EIB). KNX не зависит от конкретной аппаратной платформы. Сеть устройств KNX может управляться чем угодно, начиная с 8-разрядного микроконтроллера и заканчивая ПК, в соответствии с потребностями конкретной реализации. KNX имеет возможность передачи данных через витую пару, силовую линию, IP-сеть (EEB.net),

радиоканал. Подключенные к сети устройства могут обмениваться данными через общую шину. При успешном приеме каждое устройство подтверждает получение управляющего сигнала [5].

Технологии KNX применяются для управления освещением промышленных и офисных зданий, частных и общественных сооружений. Также рассматриваемая система поддерживает интерфейсы таких стандартов, как 0-10V DC, DALI и др.

Реализация интеллектуальной управляемой системы освещения позволит значительно снизить общий уровень энергопотребления и приведет к повышению удобства пользователей за счет новых функциональных возможностей, таких как:

- контроль состояния помещений, а именно: контроль количественных и качественных характеристик освещения в различных зонах помещения, контроль наличия людей в помещении;
- контроль состояния органов ручного управления освещением: контроль исправности светильников и режима их работы, контроль напряжения, тока, энергопотребления осветительной установки, а также характеристик качества электроэнергии;
- включение и выключение освещения в помещении полностью или по группам светильников; плавная регулировка светового потока каждого светильника или отдельных групп светильников.

### Список литературы

1. Воронин А.Ю., Зайцев С.В. Многомерная система управления тепловыми процессами печи туннельного типа // Современная наука и инновации. 2016. № 2(14). С. 29–38.
2. Зайцев С.В. Адаптивная настройка высокоточного распределенного регулятора // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 194–198.
3. Зайцев С.В., Жерносек И.А. Адаптивный распределенный высокоточный регулятор // В мире научных открытий. 2015. № 4(64). С. 83–94.
4. Зайцев С.В., Жерносек И.А. Реализация распределенного высокоточного регулятора с применением промышленного логического контроллера // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): сб. докладов. 2015. С. 623–635.
5. Душин С.Е. Теория автоматического управления: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Автоматизация и управление» и направлению подготовки дипломированных специалистов «Автоматизация и управление» / под ред. В. Б. Яковлева. М.: Высш. школа, 2009. 567 с.

## ОЦЕНКА ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Марина Николаевна Дубяго<sup>1</sup>, Николай Константинович Полуянович<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГАОУ ВО «ЮФУ», г. Ростов-на-Дону

<sup>1</sup>w\_m88@mail.ru, <sup>2</sup>nik1-58@mail.ru

Уточнена аналитическая зависимость определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жила кабеля) с учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы силовой кабельной линии (СКЛ). Разработанное программное обеспечение основано на математической модели температурного поля в сечении кабеля, отличающееся возможностью послойного контроля термофлуктуационных процессов кабеля. Проведен анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры при различных нагрузочных режимах кабеля.

**Ключевые слова:** мониторинг, термофлуктуационные процессы, изоляционные материалы, силовые кабельные линии.

## ESTIMATION OF WEAR OF INSULATING MATERIALS AND RESIDUAL RESOURCE OF POWER CABLES

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

The analytical dependence of determining the temperature of the most heated insulation point (cable core) taking into account the temperature of the cable surface, the environment and the current of the power cable line core (SCL) is clarified. The developed software is based on a mathematical model of the temperature field in the cable section, characterized by the possibility of layer-by-layer control of thermal fluctuation processes of the cable. The analysis of experimental and calculated characteristics of temperature distributions under different load conditions of the cable is carried out.

**Keywords:** monitoring, thermal fluctuation processes, insulation materials, power cable lines.

В настоящее время активно внедряется технология измерения распределённой температуры кабеля, направленная на решение этих проблем и позволяющая контролировать температуру поверхности кабеля в режиме реального времени по всей длине СКЛ [1–3]. Поэтому актуальна задача создания математических моделей и алгоритмов для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода [3–6].

Задачами непрерывного мониторинга теплового режима СКЛ являются [7, 8]:

- определение температуры кабеля по времени и месту вдоль трассы СКЛ;
- своевременное предотвращение токовых перегрузок СКЛ; - прогнозирование допустимой нагрузки при достижении кабелем максимальной рабочей температуры;
- создание оптимальных токовых нагрузок СКЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий.

На основании послойной модели распределения температур кабеля разработана математическая модель [9], позволяющая рассчитать распределение температуры по слоям (рис. 1), и выведена формула, позволяющая определять  $\theta^\circ$  в жиле.

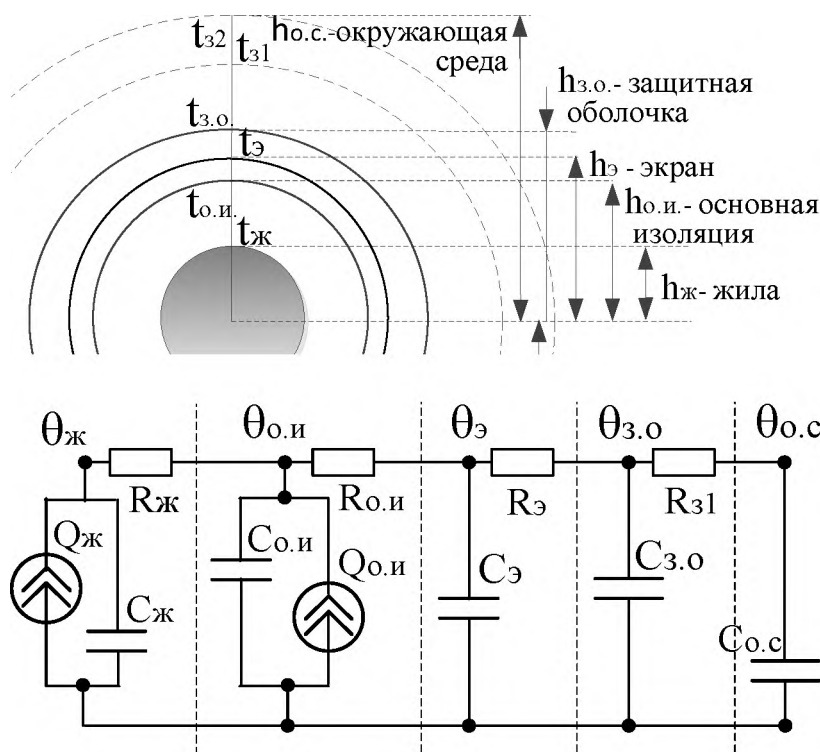


Рис. 1. Сечение кабеля и его тепловая схема замещения

Профиль температур в сечении силового кабеля АПв Пу г-1×30/25-10 определялся системой уравнений в соответствии с теорией теплопроводности (рис. 2), где  $I_ж$ ,  $I_э$  – токи в жиле и экране;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $j_ж = I_ж/S_ж$ ;  $j_э = I_э/S_э$ ;  $S_ж$ ,  $S_э$  – площади поперечного сечения жилы и экрана;  $\gamma_ж$ ,  $\gamma_э$  – электропроводности жилы и экран.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{0.c} + \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi\chi, & (h = h_{0.c}), \\ \theta(h_{0.c}) + \ln\left(\frac{r_{0.c}}{h}\right) \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi\lambda_{0.c}, & (h_{3.0} \leq h \leq h_{0.c}), \\ \theta(h_{3.0}) + \ln\left(\frac{r_{3.0}}{h}\right) \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi\lambda_{0.и}, & (h_{э} \leq h \leq h_{3.0}), \\ \theta(h_{э}) + \ln\left(\frac{h_{э}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} - \frac{j_{э}^2}{\gamma_{э}} h_{0.и}^2 \pi}{2\pi\lambda_{э}} + \frac{I_{э}^2 (h_{э}^2 - h^2)}{4\lambda_{э}}, & (h_{0.и} \leq h \leq h_{э}), \\ \theta(h_{0.и}) + \ln\left(\frac{h_{0.и}}{h}\right) \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} / 2\pi\lambda_{0.и}, & (h_{ж} \leq h \leq h_{0.и}), \\ \theta(h_{ж}) + j_{ж}^2 (h_{ж}^2 - h^2) / 4\lambda_{ж} \gamma_{ж}, & (0 \leq h \leq h_{ж}). \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с системой уравнений (1) в MatLab были построены профили температур в сечении кабеля и окружающей среды (рис. 2).

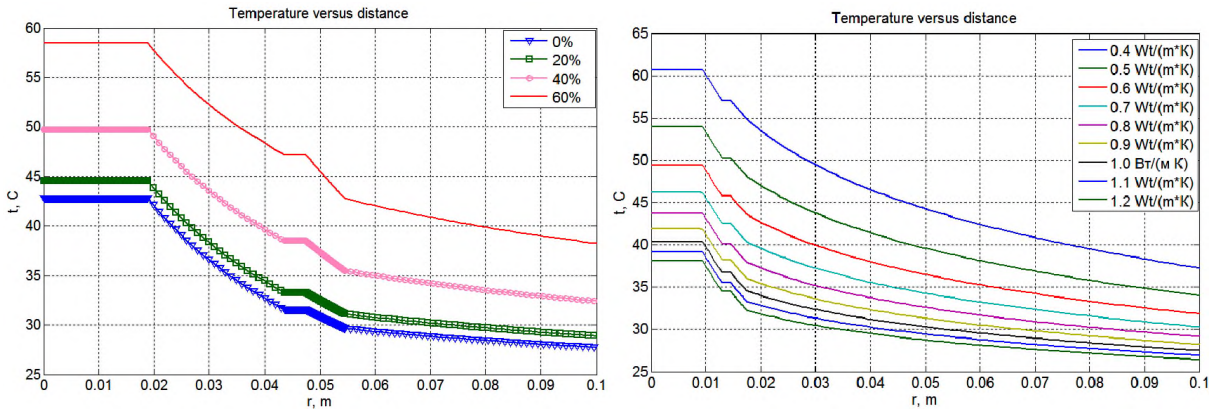


Рис. 2. Графики распределение температуры в характерных точках сечения КЛ:

*а* – при различных процентах текущего экрана на токопроводе;

*б* – при различных теплопроводностях грунта

В [10, с. 526] предложена формула измерения температуры жилы кабеля 6–35 кВ с бумажной изоляцией. С учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы кабеля рассматриваемого СПЭ кабеля, предлагается аналитическая зависимость определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жилы кабеля):

$$\theta_{ж}(t) = \theta_{3.0}(t) + \frac{nI^2 \rho_{20} m T_k K_p [1 + \alpha (\theta_{доп} - \theta_{0.c}(t))]}{S}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\text{ж}}$  – расчетная температура жилы кабеля, °C;  $\theta_{\text{з.о}} = 23$  °C – измеренная температура поверхности кабеля (защитная оболочка);  $n = 1$  – число жил кабеля;  $I$  – максимальный ток кабеля при проведении измерений, А;  $\rho_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °C;  $T_{\text{к}} = 0,0028$  °C – м/Вт – сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля;  $m$  – экспериментальный множитель;  $K_p = 1,02$  – поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре [26];  $\alpha = 0,004308$  1/°C – температурный коэффициент сопротивления материала жилы;  $\theta_{\text{доп}} = 90$  °C – длительно допустимая температура изоляции жилы;  $\theta_{\text{о.с}} = 23$  °C – измеренная температура окружающей среды;  $S = 0,0038465$  – сечение жилы кабеля, м<sup>2</sup>.

Расчетный метод определения температуры наиболее нагретой точки ИМ жилы СКЛ применяет измеренные значения температуры его поверхности температуры окружающей среды, токов жил по (2). Уравнение (2) учитывает стационарные тепловые процессы в кабеле, справедливо при установившихся значениях измеряемых величин и позволяет рассчитать температуру жилы кабеля максимально просто. При эксплуатации измеряемые величины изменяются во времени, таким образом, для их учета необходимо вести расчет нестационарных тепловых процессов.

Для проверки адекватности разработанной математической модели использовалась силовая установка с мощным понижающим трансформатором, позволяющим получить ток 640 А. Была собрана измерительная система [11] для исследования тепловых процессов в одножильных кабелях.

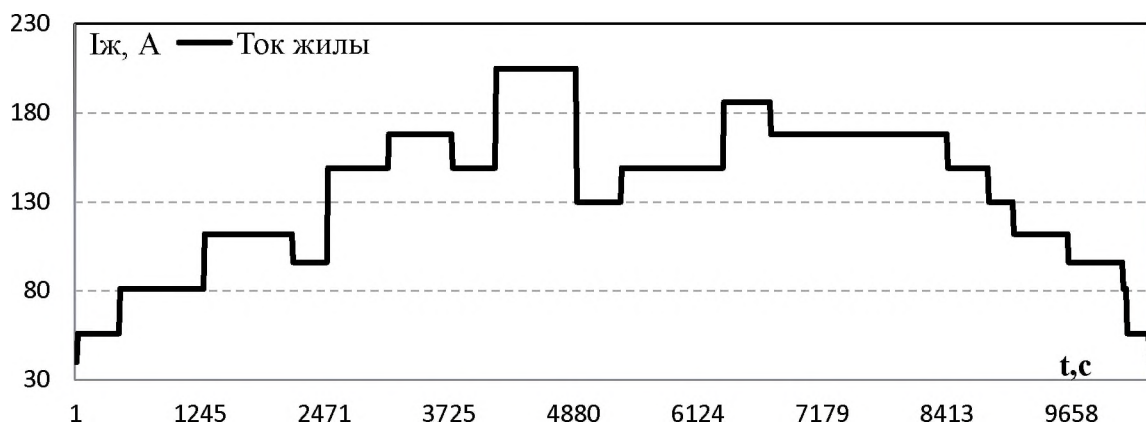


Рис. 3. Экспериментальная зависимость для действующего тока СКЛ

Датчики температуры послойно размещались внутри и на поверхности СКЛ, а также на некотором удалении от него. В качестве образца использовались отрезки заведомо исправных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10, длиной 0,85 м. На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные временные диаграммы температуры кабеля АПв Пу г-1х30/25-10 в соответствии с экспериментом, показанном на рис. 3.

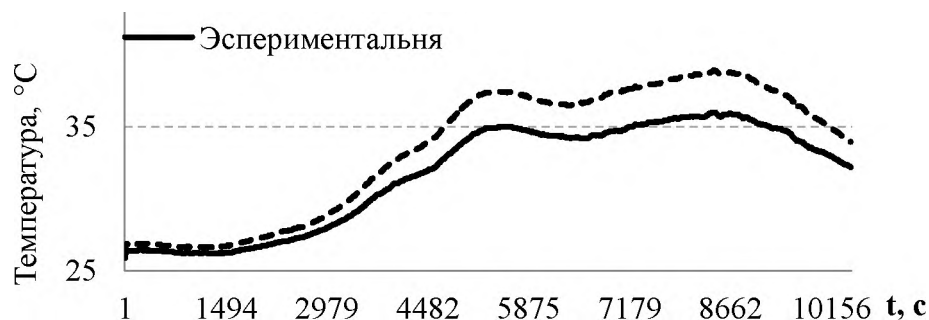


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные временные диаграммы температуры кабеля АПв Пу г-1х30/25-10

Результаты расчета показателей качества математической модели, полученные путем сравнения измеренной и расчетной температуры кабеля, приведены в таблице.

Значения показателей качества тепловой модели

| № п.п | Показатели точности расчета               | Значения погрешности по результатам расчета |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1     | Диапазон точности $\Delta\theta_{\max}$   | 2,9                                         |
| 2     | Среднее значение векторов                 | 1,8                                         |
| 3     | Коэффициент корреляции, $r$               | 0,999                                       |
| 4     | Максимальная относительная погрешность, % | 5,4                                         |

Таким образом, максимальная абсолютная погрешность расчета температуры в сравнении с непосредственно измеренной температурой не превысила 2,9 °C. Полученные высокие значения коэффициента корреляции, равные 0,999, говорят о достаточной адекватности математической модели реальным тепловым процессам. Предложенная аналитическая зависимость может применяться в качестве базовой при вычислении тепловых процессов СКЛ в режиме реального времени, так как ее соответствие подкреплено опытными данными. Полученные диаграммы свидетельствуют о явной корреляции экспериментальных и расчетных кривых температуры, что говорит о верном направлении при выборе математической модели [12].



## Список литературы

1. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в кабельном канале и определение рациональной передаваемой мощности кабелей // Прикладная математика, механика и процессы управления: мат. всероссийской научн.-техн. интернет-конф. студентов и молодых учёных. Пермь, 2013. Т. 1. С. 217–227.
2. Титков В., Дудкин С. Кабельные линии 6–10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим // Новости электротехники. 2012. № 3. С. 6–9.
3. Дубяго М.Н., Пшихопов В.Х., Полуянович Н.К. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 7(168). С. 230–237.
4. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование 2012. № 1(8). С. 27–33.
5. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В. Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3. С. 9–15.
6. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В. Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: сб. матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Ростов-на-Дону, 2018. С. 164–167.
7. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 752–753. P. 1153–1157.
8. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // Advances in energy, environment and chemical engineering. 2015. P. 49–54.
9. Метод оценки ресурса силовых кабелей [URL]: <http://energoblabssoft.com/articles/ResourceOfCables.pdf>.
10. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. М.: Папирус ПРО, 2004. Т. 3. 674 с.
11. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7(132). С. 200–205.

12. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнение для расчета номинальной токовой нагрузки (100% коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2009. 28 с.

13. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges // Advances in Materials Science and Applications. 2015. Vol. 4. № 1. P. 23–32.

14. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Буланович Д.И. Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: сб. матер. XI Всерос. науч.-техн. конф. Ростов-на-Дону, 2018. С. 164–167.

15. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А. Методы испытания силового электрооборудования. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. 280 с.

УДК 621.314.2

## **РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОСЛЕ УСТАНОВКИ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Леонид Валерьевич Фетисов<sup>1</sup>, Олег Андреевич Булатов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>leonidfetisov@mail.ru, <sup>2</sup>oleg.bulatov.2018@mail.ru

Данная статья посвящена разработке мероприятий по повышению качества электроэнергии в сельских районах, а также в местностях, удаленных от населенных пунктов, путём установки вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), и расчёту экономического эффекта в сравнении с альтернативными вариантами решения задач по обеспечению надежного, качественного и доступного электроснабжения потребителей.

**Ключевые слова:** вольтодобавочный трансформатор, повышение качества электроэнергии, электроснабжение потребителей, экономический эффект.

## **CALCULATION OF ECONOMIC EFFICIENCY AFTER INSTALLATION OF THE FILLING UTILITY TRANSFORMER IN THE DISTRIBUTIVE NETWORKS OF LOW VOLTAGE**

L.V. Fetisov, O.A. Bulatov

This article is devoted to development of actions for improvement of quality of the electric power in rural areas and also in the areas remote from settlements, by installation of booster transformers (BT), and to calculation of economic effect in comparison with alternative versions of the solution of tasks of ensuring reliable, high-quality and available power supply of consumers.

**Keywords:** the booster transformer, improvement of quality of the electric power, power supply of consumers, economic effect.

Для электросетевых компаний России и мира соблюдение нормативного уровня напряжения является актуальной проблемой. Как в производстве, так и в быту применяется множество электроприборов, в состав которых входят элементы, достаточно чувствительные к изменениям напряжения от допустимых значений. Сбой в их работе может обусловить выход из строя оборудования или расстройство технологических процессов. В свою очередь, это может привести к экономическим потерям для электросетевых компаний, так как потребитель вправе потребовать не только замену вышедшего из строя оборудования, но и денежные средства за недопоставку электрической энергии.

Потребитель электрической энергии – юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью) на основании заключенного договора.

Качество электрической энергии – степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электроэнергии [1].

Список основных показателей качества электрической энергии регламентируется ГОСТ 32144-2013 (вступил в силу 1 июля 2014 г.) и выглядит следующим образом:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- коэффициент временного перенапряжения и т. п.

Вольтодобавочный трансформатор – электрический трансформатор с переменным коэффициентом трансформации, включаемый своей вторичной обмоткой последовательно в цепь вторичной обмотки другого трансформатора для регулирования или стабилизации напряжения в цепи нагрузки [2]. Первичная обмотка ВДТ питается через регулируемый автотрансформатор низшего напряжения основного трансформатора. Разновидность ВДТ – линейные трансформаторы для поперечного регулирования, позволяющие сдвигать по фазе напряжение сети, не изменяя его значения. В этом случае первичная обмотка регулируемого автотрансформатора каждой фазы включается на линейное напряжение двух других фаз. Вследствие улучшения коэффициента мощности достигается снижение потерь напряжения в электрической сети.

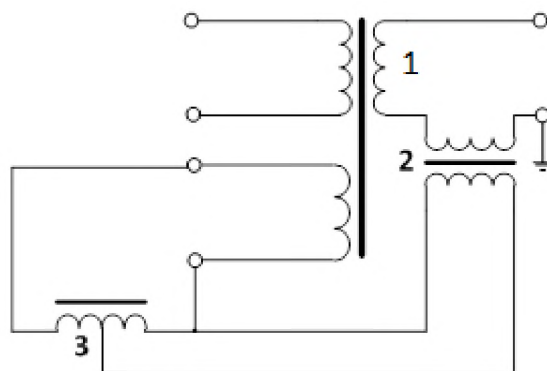


Рис. 1. Принципиальная схема включения вольтодобавочного трансформатора:  
1 – основной трансформатор; 2 – вольтодобавочный трансформатор;  
3 – автотрансформатор

До 2013 г. в России вследствие роста нагрузок и падения напряжения в конце некоторых линий электропередач (ЛЭП) задача по восстановлению уровня напряжения до допустимых значений решалась путем реконструкции ЛЭП, строительством новой ВЛ-0,4 кВ или установкой понижающей трансформаторной подстанции ближе к проблемному участку [3].

Сейчас же можно решить данную проблему путем установки вольтодобавочного трансформатора.

Рассмотрим 3 варианта и сравним трудозатраты работников, использованные материалы для улучшения качества электроэнергии потребителей, а также пусконаладочные работы, являющиеся комплексом работ, выполняемых в период подготовки и проведения индивидуальных испытаний и комплексного опробования оборудования.

В качестве примера сравним три варианта (таблица):

1 вариант – реконструкция ЛЭП с заменой провода на провод с большим сечением. Выбрана марка провода СИП-2 3×50+1×54,6;

2 вариант – строительство участка ВЛ-6 кВ с установкой ТП и строительство участка ВЛ-0,4 кВ до потребителей;

3 вариант – установка ВДТ на существующей ЛЭП-0,4 кВ [4].

Таблица

Сравнительный анализ методов по устранению низкого напряжения у потребителей по состоянию на 2017 г.

| Наименование работ и затрат | Стоимость, руб. |           |           |
|-----------------------------|-----------------|-----------|-----------|
|                             | 1 вариант       | 2 вариант | 3 вариант |
| Материалы                   | 218 368         | 1 932 487 | 691 008   |
| Монтаж                      | 44 020          | 168 042   | 24 869    |
| Пусконаладочные работы      | 17767           | 42651     | 2735      |
| Итого                       | 280 155         | 2 143 180 | 718 612   |

Таким образом, из таблицы видно, что наиболее дорогостоящим методом по устранению низкого напряжения у потребителей является 2-й вариант – строительство участка ВЛ-6 кВ с установкой ТП и строительство участка ВЛ-0,4 кВ до потребителей. Этот вариант применяется реже не только из-за его дороговизны, но и за счет отсутствия места для строительства в населенных пунктах. При этом данный метод является наиболее надежным из представленных и может применяться в случае большой перспективы развития сетей в конкретной локации [7].

1 вариант – реконструкция ЛЭП с заменой провода на провод с большим сечением по затратам на материалы (провод, лента крепления, кронштейны, хомуты, ответвительные и анкерные зажимы, скрепа и т. п.) является наиболее выгодным, но при оперативном обслуживании не представляется возможным. Это объясняется тем, что сетевые организации закладывают бюджет на капитальный ремонт и строительство новых линий заблаговременно. Когда встает вопрос о скором разрешении проблемы по обеспечению качественной электроэнергии у потребителей, возникает множество нюансов, которые не позволяют оперативно решить проблему. Прежде всего, это заказ оборудования и материалов, который во многих сетевых организациях проходит поквартально [5, 6].

Что же касается 3-го варианта – установки ВДТ на существующей ЛЭП-0,4 кВ, то здесь можно отметить, что при планировании бюджета на будущий год можно заложить несколько вольтодобавочных трансформаторов в зависимости от количества обслуживаемых электросетей и использовать их при необходимости [8]. Преимуществом ВДТ является также и возможность перенести ВДТ с одного проблемного участка на другой. На объектах, где решение вопроса низкого напряжения требует работ капитального характера, ВДТ можно применять как временное решение вопроса с дальнейшим разукрупнением или реконструкцией ВЛ-0,4 кВ. Таким образом, можно максимально быстро отреагировать на жалобу без срочных капиталовложений. А со временем, когда будут проведены работы капитального характера и ВДТ будет не нужен, его легко можно перенести на другой объект, требующий стабилизации и повышения напряжения.

Вольтодобавочные трансформаторы можно наиболее эффективно использовать как завершающее решение проблемы низкого напряжения на ВЛ 0,4 кВ большой протяженности при отсутствии возможности разукрупнения ВЛ в стесненных условиях, где нет возможности подвода сети

6(10) кВ, не существует возможность установить дополнительную комплектную трансформаторную подстанцию, или затраты на разукрупнение ВЛ-0,4 кВ в несколько раз превосходят стоимость установки ВДТ.

### Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 2014. 36 с.

2. Бутырин П.А., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н. Основы электротехники: учебник. М.: МЭИ, 2014. 360 с.

3. Булатов О.А., Фетисов Л.В. Повышение энергоэффективности распределения электрической энергии в сетях низкого напряжения с применением вольтодобавочных трансформаторов // Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2017. С. 13–17.

4. Булатов О.А. Повышение энергоэффективности распределения электрической энергии с применением бустерных трансформаторов // Тр. междун. науч.-практ. конф. молодых ученых. Альметьевск, 2017. С. 80–84.

5. Управление эффективностью в электроэнергетике: инновационные подходы / Г.В. Вагапов [и др.] // Вестник экономики, права и социологии. 2015. № 3. С. 186–189.

6. Трансформатор с парными выходными обмотками: п. м. 76159 Рос. Федерация № 2008113828/22; заявл. 08.04.08; опубл. 10.09.08, Бюл. № 25.

7. Панов Д.Ю., Денисова А.Р. Энергоэффективные мероприятия в административных учреждениях // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): сб. матер.V Всерос. науч.-техн. конф. (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Тольятти, 2017. С. 268–272.

8. Управление эффективностью в электроэнергетике: инновационные подходы / Н.А. Вагапова [и др.] // Вестник экономики управления и права. 2015. № 3. С. 186.

## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЦЕНОВЫХ КАТЕГОРИЙ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

А.А. Кривошеева

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
Krivosheeva\_Ann@mail.ru

Рассмотрены для сравнения различные тарифы на электроэнергию для крупного потребителя, выполнен анализ графиков нагрузки данного предприятия.

**Ключевые слова:** электроэнергия, ценовая категория, тариф, график нагрузки, стоимость электроэнергии.

## ASSESSMENT OF THE USE OF VARIOUS PRICE CATEGORIES ON THE ELECTRIC ENERGY

Krivosheeva A.A.

The different tariffs for payment for the electric power of the large consumer are considered for comparison, the daily load curves of this enterprise are analyzed.

**Keywords:** Electric energy, price category, tariff, daily load curve, electric power cost.

На розничном рынке электроэнергии в настоящее время для расчетов доступны 6 различных ценовых категорий. Предприятиям с потребляемой мощностью более 670 кВт и до 10 МВт можно пользоваться только ценовыми категориями с третьей по шестую в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 [1]. Для выбора подходящей и наиболее выгодной категории необходимо проанализировать графики нагрузки предприятия и ценовую политику региона.

В данной работе для сравнительного анализа использовались данные крупного потребителя электроэнергии, для примера был взят месячный график нагрузки за январь 2018 г. Январь интересен тем, что в нем много выходных дней, что позволяет получить усредненный график нагрузки не только для будних, но и для выходных дней. Также необходимо отметить, что на предприятии имеются объекты с круглосуточным режимом работы, поэтому суточное потребление электроэнергии в отдельные выходные дни превышает потребление рабочего дня (рис. 1). При этом в выходные дни суточный график более равномерен.

Далее были проведены расчеты для сравнения тарифных планов. Предприятием выбрана для расчетов 4-я ценовая категория, уровень напряжения высшего напряжения. На официальном интернет-ресурсе «Мосэнергосбыт» [2] использовался тарифный калькулятор для условий

г. Москвы, в качестве исходных данных вводится максимальная мощность предприятия, профили потребления для рабочего и выходного дня (усредненные графики), уровень напряжения. Расчеты показали третью ценовую категорию в качестве оптимальной.

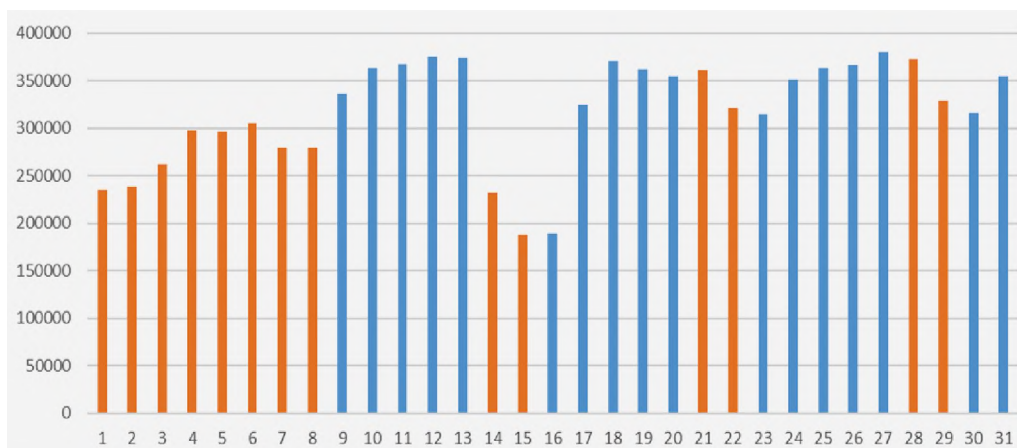


Рис. 1. Посуточное потребление электроэнергии

Для получения усредненных графиков за месяц по аналогии с [3] были вычислены средние значения потребляемой мощности за каждый час  $P_{\text{ср.ч}}$  и среднеквадратическое отклонение  $S$  (СКО) по известным формулам:

$$P_{\text{ср.ч}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{ч}}}{n}; \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{ч}} - P_{\text{ср.ч}})^2}{n}}.$$

Полученный усредненный суточный график нагрузки представлен на рис. 2, значения средней нагрузки и СКО – в таблице.

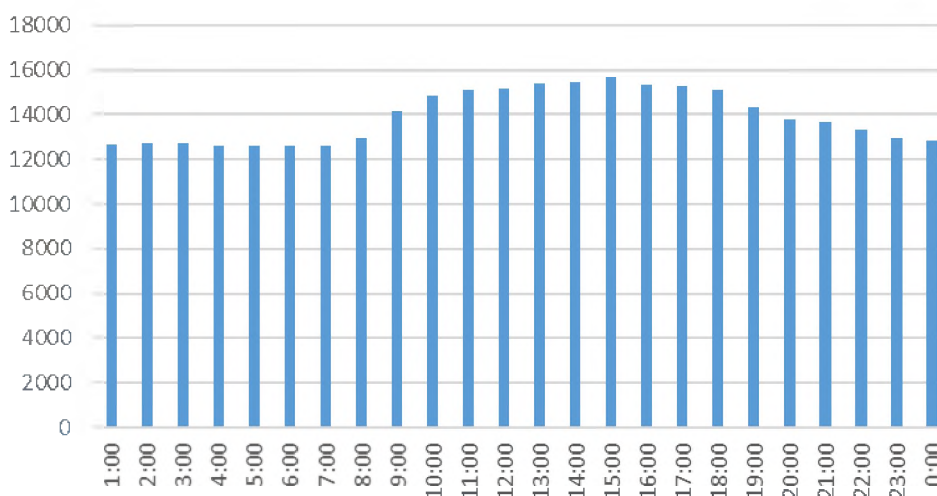


Рис. 2. Усредненный график нагрузки



### Средняя нагрузка и СКО

| Час   | $P_{\text{ср.ч}}$ | СКО  | СКО, % | Час   | $P_{\text{ср.ч}}$ | СКО  | СКО, % |
|-------|-------------------|------|--------|-------|-------------------|------|--------|
| 1:00  | 12 650            | 2952 | 23,3   | 13:00 | 15 380            | 4109 | 21,9   |
| 2:00  | 12 714            | 3062 | 24,1   | 14:00 | 15 442            | 4040 | 21,0   |
| 3:00  | 12 702            | 3024 | 23,8   | 15:00 | 15707             | 4031 | 20,6   |
| 4:00  | 12 630            | 3021 | 23,9   | 16:00 | 15357             | 4080 | 21,4   |
| 5:00  | 12 586            | 3011 | 23,9   | 17:00 | 15293             | 4030 | 21,0   |
| 6:00  | 12 585            | 3057 | 24,3   | 18:00 | 15080             | 3837 | 19,7   |
| 7:00  | 12 606            | 3024 | 24,0   | 19:00 | 14339             | 3473 | 17,9   |
| 8:00  | 12 989            | 3107 | 23,9   | 20:00 | 13800             | 3253 | 16,8   |
| 9:00  | 14 163            | 3645 | 25,7   | 21:00 | 13658             | 3290 | 16,5   |
| 10:00 | 14 836            | 3938 | 26,5   | 22:00 | 13322             | 3217 | 16,5   |
| 11:00 | 15 064            | 4221 | 28,0   | 23:00 | 12983             | 3065 | 16,0   |
| 12:00 | 15 178            | 4184 | 27,6   | 0:00  | 12821             | 3123 | 15,7   |

Среднеквадратичное отклонение нагрузки составило в разные часы от 15,7 до 28 % от среднечасового значения, что достаточно существенно. Разделение выборки позволило получить усредненные графики отдельно для будних и выходных дней, но среднеквадратичное отклонение снизилось незначительно. Из этого можно сделать вывод, что использовать пятую и шестую ценовые категории в настоящее время нецелесообразно, так как планирование нагрузки при таких отклонениях проблематично, а за отклонение от плановых графиков могут взиматься штрафы [3]. Для этих ценовых категорий предусмотрено два вида штрафных санкций – плата за превышение фактического почасового объема электрической энергии над соответствующим плановым почасовым объемом и за превышение планового почасового объема электрической энергии над соответствующим фактическим почасовым объемом [4]. При этом ставки тарифов за электроэнергию по 3-й и 5-й категориям для Москвы в январе 2018 г. различались всего на 29 руб. за 1 МВт·ч [2], что при переходе на 5 категорию позволит экономить не более 2 % от стоимости электроэнергии. На такую же величину отличаются ставки по 4-й и 6-й категориям.

Поэтому дальнейшее сравнение проводилось только для третьей и четвертой ценовых категорий в годовом разрезе.

Третья ценовая категория рассчитывается для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых за расчетный период осуществляется почасовой учет, но не осуществляется почасовое планирование, а стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу на услуги по передаче электрической энергии в одноставочном выражении [4].

Стоимость электроэнергии за расчетный месяц для 3-й категории:

$$C_{3ц.к} = C_{3ц.к(э\acute{э})} + P_{\max} T_{\text{мощность}},$$

где  $C_{3ц.к(э\acute{э})}$  – стоимость электроэнергии за месяц;  $P_{\max}$  – величина мощности, определяемая как среднеарифметическое значение для каждого суток, взятых в часы максимума фактической пиковой нагрузки по субъекту РФ, МВт;  $T_{\text{мощность}}$  – цена на мощность, оплачиваемую на оптовом рынке, руб./МВт.

Четвертая ценовая категория рассчитывается для объемов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых за расчетный период осуществляется почасовой учет, но не осуществляется почасовое планирование, а стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу на услуги по передаче электрической энергии в двухставочном выражении [4].

Стоимость электроэнергии за расчетный месяц для 4 категории:

$$C_{4ц.к} = C_{3ц.к(э\acute{э})} + P_{\max} T_{\text{мощность}} + P_{\text{сеть}} T_{\text{сеть}},$$

где  $P_{\max}$  – величина мощности, определяемая как среднеарифметическое максимумов для каждого рабочих суток месяца, взятых из диапазона плановых часов пиковой нагрузки, МВт;  $P_{\text{сеть}}$  – цена на мощность, передаваемую по сети, в тарифе на передачу, руб./МВт.

Проведенные расчеты показывают, что наиболее экономически выгодной для рассматриваемого предприятия является четвертая ценовая категория. Несмотря на то, что в третьей категории нет оплаты за услуги по передаче электрической энергии и содержание электрических сетей, почасовые ставки этой категории значительно превышают ставки для четвертой категории тарифа (для января 2018 г на 1051,43 руб./МВт·ч), что, вероятно, и играет решающую роль. Двухставочный тариф во многом зависит от равномерности графиков нагрузки, а также посуточных графиков. Чем они более равномерны, тем больше число часов использования максимума нагрузки (такое время, в течение которого через электрическую сеть, работающую с максимальной нагрузкой, передавалось бы такое же количество электроэнергии, которое передается через нее в течение года по действительному графику нагрузки). Это обеспечивает выгоду при оплате электроэнергии по двухставочному тарифу.

Таким образом, расчеты подтверждают правильность использования предприятием четвертой ценовой категории, несмотря на то, что калькулятор Мосэнергосбыта рекомендовал третью ценовую категорию. Видимо, сказываются отклонения графиков нагрузки от усредненных, закладываемых в калькулятор. Однако в случае изменения типового почасового графика нагрузки предприятия к более стабильному и легко прогнозируемому, целесообразно рассмотреть использование категорий, требующих планирования, при этом имеющих меньшие почасовые ставки.

### **Список литературы**

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии на 2012 год: постановление Правительства Рос. Федерации от 4 мая 2012 г. № 442 (ред. от 21 декабря 2018 г.).
2. Энергосбытовая компания «Мосэнергосбыт»: сайт. URL: [http:// www.mosenergosbyt.ru](http://www.mosenergosbyt.ru).
3. Матюнина Ю.В., Малыш М.Е., Султаналиева Э.М. Оценка штрафных санкций при неточном планировании графика нагрузки // XLVII Междунар. науч.-практ. конф. «Федоровские чтения – 2017». М., 2017. С. 123–128.
4. Об определении и применении гарантирующими поставщиками нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность): постановление Правительства Рос. Федерации от 29 декабря 2011 г. № 1179 (ред. от 30 июня 2018 г.).

УДК 621.311

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Дмитрий Олегович Меренцев<sup>1</sup>, Иван Николаевич Паскарь<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>КузГТУ, г. Кемерово

<sup>1</sup>dima52236@yandex.ru, <sup>2</sup>paskar-ivan@mail.ru

Произведен прогноз электропотребления методами Хольта-Винтерса и Р. Брауна. В качестве базиса для выполнения прогноза на будущий год используются данные по электропотреблению за прошедшие года.

**Ключевые слова:** методы прогнозирования, электропотребление, энергетическая эффективность, графики электрической нагрузки.

## FORECASTING ELECTRIC CONSUMPTION OF CHEMICAL ENTERPRISE

D.O. Merentsev, I.N. Paskar.

The forecast of power consumption by Holt-Winters and R. Brown methods was made. As a basis for the fulfillment of the forecast for the next year, data on electricity consumption for the past years is used.

**Key words:** forecasting methods, power consumption, energy efficiency, electrical load graphs.

Прогнозирование электропотребления является важнейшей областью исследования в электроэнергетике. Оно необходимо для решения практически всего ряда задач планирования и максимально оперативного управления режимами функционирования электроэнергетической системы. С помощью прогнозирования рассчитываются оптимальные электрические режимы электроэнергетической системы, оценивается их надежность, экономичность, качество электроэнергии [1].

Прогнозирование в энергетике является актуальной темой, несмотря на массу уже проведенных исследований. В данной статье рассмотрим метод прогнозирования Хольта-Винтерса и модель адаптивного сглаживания Р. Брауна для химического предприятия.

Первым будем использовать метод Хольта-Винтерса, включающий в себя три элемента: сезонность, тенденцию развития и сглаженный экспоненциальный ряд. С помощью экспоненциального сглаживания можно выявить направление развития ряда динамики, сгладить колебания в ряду динамики для поиска частных спадов и скачков [4].

Для выполнения прогноза используется Microsoft Excel, где достаточно просто можно выстроить логическую связь формул, а также построить графики для большей наглядности.

Экспоненциально-сглаженный ряд рассчитывается по формуле:

$$L_t = \frac{k \cdot y_t}{S_{t-s}} + (1 + k)(L_{t-1} - T_{t-1}). \quad (1)$$

Коэффициент сглаживания ряда  $k$  задавался вручную в диапазоне от 0 до 1. Для первого периода в начале данных экспоненциально-сглаженный ряд равен первому значению ряда  $L_1 = y_1$ .

Далее определяется тренд по формуле:

$$T_t = b \cdot (L_t - L_{t-1}) + (1 - b) \cdot T_{t-1}. \quad (2)$$

Коэффициент сглаживания тренда  $b$  задается вручную и находится в диапазоне от 0 до 1. Значение тренда для первого периода равно 0.

Далее оцениваем сезонность по формуле:

$$S_t = q \cdot \frac{y_t}{L_t} + (1 - q) \cdot S_{t-s}. \quad (3)$$

Коэффициент сезонности для первого года равен 1.

Далее осуществляется прогноз по формуле:

$$\tilde{y}_{t+p} = (L_t + p \cdot T_t) \cdot S_{t-s+p}. \quad (4)$$

Ниже представлено графическое изображение электропотребление и прогноз электропотребления по методу Хольта-Винтерса.

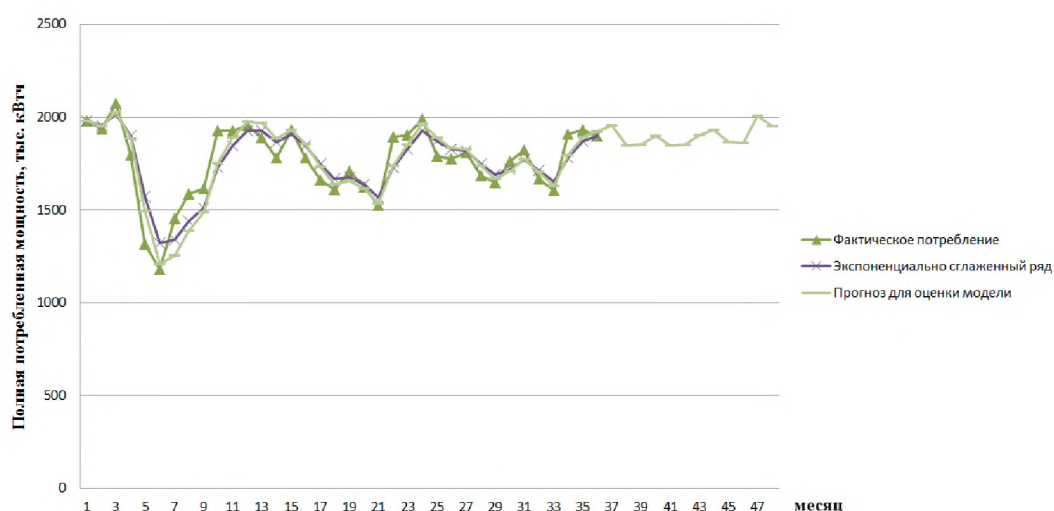


Рис. 1. Графическое изображение прогноза по методу Хольта-Винтерса

Для метода Хольта-Винтерса также необходимо оценить точность прогноза. Точность прогноза рассчитывается по следующему алгоритму. Вначале значение прогнозной модели определяется:

$$\bar{y}_t = L_{t-1} + T_{t-1}. \quad (5)$$

Далее находится ошибка модели по формуле:

$$\gamma_t = y_t - \bar{y}_t. \quad (6)$$

Расчет точности прогноза определяется как отклонение ошибки модели от прогнозной модели:

$$\Delta\gamma_t = \frac{\gamma_t^2}{y_t^2}. \quad (7)$$

Согласно расчетам у данного прогноза точность составляет 97,5 %, что является хорошим показателем и позволяет строить прогнозы на большой промежуток времени, так как учитывает несколько факторов прогнозирования.

Далее рассмотрим адаптивную полиномиальную модель Р. Брауна, основанную на экспоненциальном сглаживании. Модель Брауна основана на логичной идеи построения модели, компьютерной реализации метода, возможности оптимизации модели путем адаптации [4].

Потребление электрической энергии зависит от различных факторов. В различные временные периоды одни факторы усиливают своё влияние, другие уменьшают [3]. Модель подстраивается к временному ряду показателя, отражающего этот процесс. Расчёт параметров осуществляется по рекуррентной формуле:

$$S_t = \alpha y_t + \beta S_{t-1}. \quad (8)$$

После того, как были вычислены экспоненциальные средние  $S_t$  по формуле (8), они сами образуют временной ряд. Обозначим его члены через  $S_t$ . Верхний индекс показывает, что это результат первого сглаживания. Этот ряд можно сгладить еще раз, воспользовавшись аналогичной формулой:

$$S_t^{(2)} = \alpha S_t + \beta S_{t-1}^{(2)}. \quad (9)$$

Процедура прогнозирования временных рядов на основе адаптивных полиномиальных моделей состоит из следующих этапов:

1. Выбирается вид модели экспоненциального сглаживания, задается значение параметра сглаживания  $\alpha$ . При выборе порядка адаптивной полиномиальной модели используются различные методы. В данном случае используется метод последовательных разностей.

2. Определяются исходные условия. С помощью указанных в таблице формул, находятся начальные значения экспоненциальных средних.

3. Производится расчет значений соответствующих экспоненциальных средних.

4. Находятся оценки коэффициентов модели.

5. Производится прогноз на одну точку вперед. Находится отклонение фактического значения временного ряда от прогнозируемого.

6. Окончательная прогнозная модель формируется на последнем шаге в момент  $t = n$ . Отличительной особенностью рассмотренных моделей следует считать то, что при поступлении новой информации все расчеты повторять необязательно.

Ниже представлен график электропотребления и прогноз электропотребления, согласно методу адаптивного сглаживания Брауна.

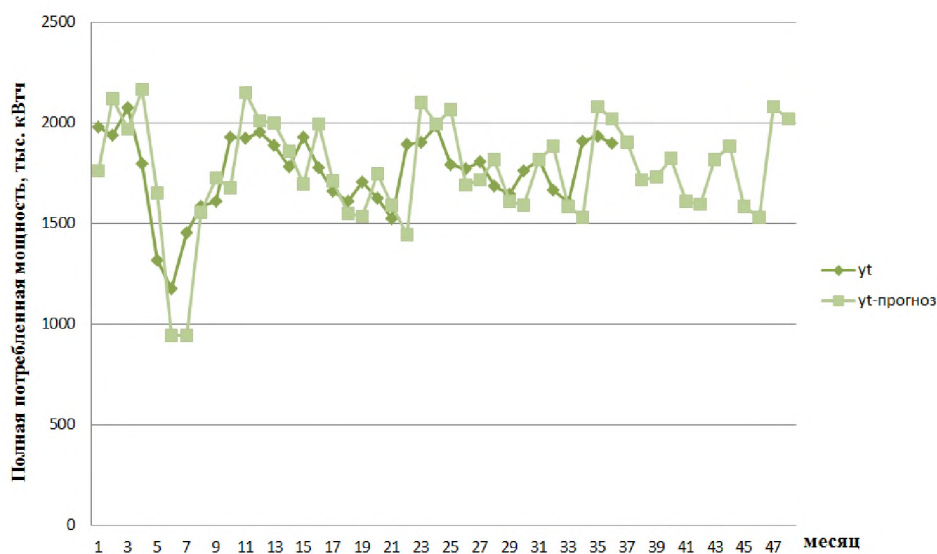


Рис. 2. Графическое выражение прогноза

Точность прогноза составила 93,6 % .

Недостатком этой модели является использование единственного параметра адаптации  $\alpha$ . Это снижает диапазон применения, поскольку невозможно описать все многообразие рядов с помощью одной изменяемой величины.

Проанализировав данные по электропотреблению химического предприятия за период 2014–2017 гг. включительно был произведен прогноз по методам Хольта-Винтерса и Р. Брауна. Точность прогноза по методу Хольта-Винтерса составила 97,5 %, по модели Р. Брауна – 93,6 %. Из двух рассмотренных видов прогнозирования более точным является метод Хольта-Винтерса. Данные методы при использовании их на промышленном предприятии позволят не нарушать установленные лимиты электропотребления, вследствие чего предприятие не понесет дополнительные убытки [1].

### Список литературы

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие. Ростов-на-Дону. Красноярск: Издательские просторы, 2006. 720 с.
2. Современная энергетика / С.М. Алдошин [и др.] // Наука в России. 2013. № 2. С. 17–20.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. 2-е изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 672 с.
4. Гнатюк В.И. Оптимальное управление электропотреблением регионального электротехнического комплекса (техноценоза). М.: ИНП РАН, 2006. 147 с.

## СПОСОБ УЧЕТА ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ В ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НОРМАТИВНЫХ ПОТЕРЬ

Алексей Вячеславович Малафеев<sup>1</sup>, Оксана Евгеньевна Шепилова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

<sup>1</sup>malafeev.av@magtu.ru, <sup>2</sup>ks-s-sh@mail.ru

В работе рассмотрен подход к определению долевого вклада потребителей территориальной сетевой организации (ТСО) в потере мощности, основанный на рекурсивном обходе расчетной схемы от каждого из потребителей при рассчитанном ранее потокораспределении. Подход позволяет оценить полноту компенсации потерь в сетях ТСО со стороны потребителей, присоединенных к ее сетям, в условиях оплаты услуг на передачу электроэнергии по котловому тарифу, а также разрабатывать мероприятия по совершенствованию нормативов технологических потерь электроэнергии.

**Ключевые слова:** территориальная сетевая организация, ставка на оплату потерь, котловой тариф, индивидуальный тариф для взаиморасчетов, тариф покупки потерь, нормативные технологические потери электроэнергии, потери активной мощности, услуги по передаче электроэнергии, вклад потребителя.

## METHOD OF ACCOUNTING CONTRIBUTION OF CONSUMERS OF THE NETWORK ORGANIZATION IN THE LOSS OF POWER FOR EVALUATING NORMATIVE LOSS VALUES

Malafeev Aleksey Vyacheslavovich, Shepilova Oksana Evgenyevna

The paper considers an approach to determining the share contribution of the consumers of the territorial grid organization (TGO) to power losses, based on a recursive bypass of the settlement scheme from each of the consumers with the previously calculated flow distribution. The approach makes it possible to assess the completeness of compensation for losses in TGO networks from consumers connected to its networks in terms of payment of services for the transmission of electricity at the boiler tariff, as well as to develop measures to improve the standards of technological losses of electricity

**Keywords:** territorial network organization, rate for payment of losses, common tariff, individual tariff for mutual settlements, rate of purchase of losses, regulatory technological losses of electricity, losses of active power, electricity transmission services, consumer contribution.

В соответствии с действующими «Правилами недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг»<sup>1</sup> на территории субъектов Российской Федерации устанавливаются единые котловые тарифы на оплату услуг сетевых компаний, дифференцированные по уровням напряжения, на которых присоединены потребители

---

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861 (ред. от 13 августа 2018 г.).



(ВН, СНІ, СНІІ, НН). Порядок расчета тарифов определяется «Методическими указаниями по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке»<sup>2</sup>. В соответствии с ним базой для расчета ставки на оплату потерь является сводный прогнозный баланс электроэнергии по региональной энергосистеме, одной из составляющих которого являются нормативные технологические потери электроэнергии (НТПЭ), рассчитываемые территориальной сетевой организацией (ТСО) [1] и утверждаемые Минэнерго РФ. Вместе с тем соответствующая ставка индивидуального тарифа для взаиморасчетов между ТСО и сетевой компанией – котлодержателем (как правило, соответствующей МРСК), определяется только лишь сальдо-перетоком для конкретной ТСО; тариф на покупку потерь рассчитывается также индивидуально для каждой ТСО. Таким образом, полнота компенсации стоимости потерь электроэнергии со стороны потребителей во многом зависит от правильности расчета НТПЭ. Оценка корректности значений НТПЭ в течение регулируемого периода возможна за счет выявления долевых вкладов отдельных потребителей в общие потери ТСО.

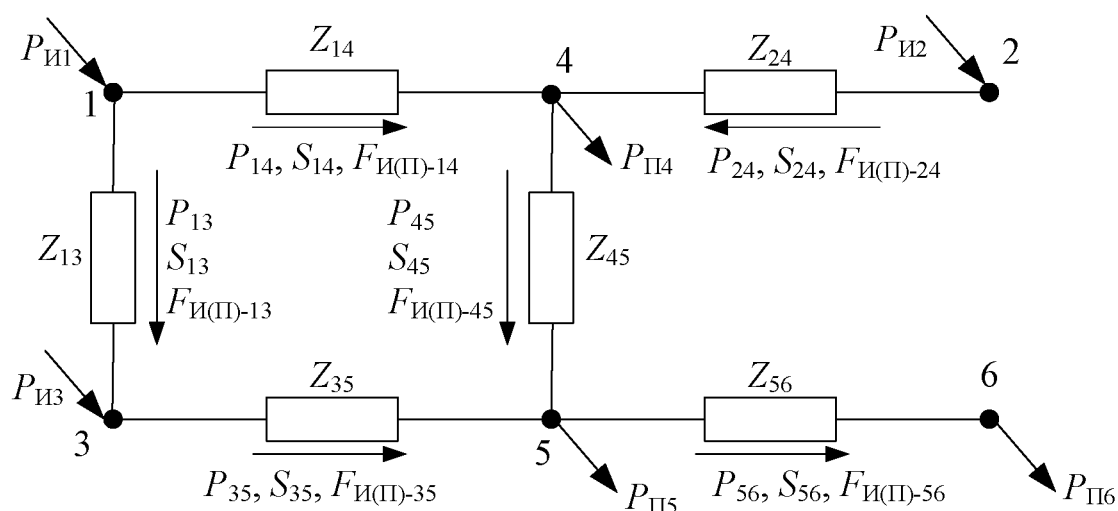


Рис. 1. Участок электрической сети с тремя источниками питания

<sup>2</sup> Приказ Федеральной службы по тарифам России от 6 августа 2004 г. № 20-э/2 (ред. от 14 апреля 2014 г., с изм. от 16 сентября 2014 г.).

Расчет организован в виде цикла по числу нагрузочных узлов, внутри которого для каждого из них запускается рекуррентная функция DetectShareConsumer. Функция выполняет обход схемы в соответствии с рассчитанным ранее потокораспределением активных мощностей. КДВП для узла рассчитывается тогда, когда определены КДВП по всем выходящим ветвям, что контролируется путем установки флагов IsCalcFL. Для всех входящих ветвей КДВП принимается одинаковым.

Расчетные формулы имеют следующий вид:

$$F_{\Pi Mi-k} = \frac{F_{\Pi Mi-jk} P_{jk} + F_{\Pi Mi-(j+1)k} P_{(j+1)k} + \dots + F_{\Pi Mi-(n-1)k} P_{(n-1)k} + F_{\Pi Mi-nk} P_{nk}}{P_{jk} + P_{(j+1)k} + \dots + P_{(n-1)k} + P_{nk}}, \quad (1)$$

$$F_{\Pi Pi-k} = \frac{F_{\Pi Pi-jk} S_{jk}^2 + F_{\Pi Pi-(j+1)k} S_{(j+1)k}^2 + \dots + F_{\Pi Pi-(n-1)k} S_{(n-1)k}^2 + F_{\Pi Pi-nk} S_{nk}^2}{S_{jk}^2 + S_{(j+1)k}^2 + \dots + S_{(n-1)k}^2 + S_{nk}^2}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер потребителя;  $j, j+1, j+2, \dots, n-1, n$  – номера ветвей, выходящих из узла, для которого определяется КДВП;  $k$  – номер узла, для которого определяется КДВП;  $P_{jk}, S_{jk}$  – потоки активной и полной мощностей соответственно по ветви  $j$  из узла  $k$ .

В случае, если в границах ТСО функционируют электростанции, являющиеся субъектами розничного рынка электроэнергетики, необходимо учитывать стоимость, указанную в договоре с соответствующей генерирующей компанией. В этом случае формулы (1) и (2) будут иметь несколько иной вид:

$$F_{\Pi Mi-k} = \frac{F_{\Pi Mi-jk} C_{jk} P_{jk} + F_{\Pi Mi-(j+1)k} C_{(j+1)k} P_{(j+1)k} + \dots + F_{\Pi Mi-nk} C_{nk} P_{nk}}{C_{jk} P_{jk} + C_{(j+1)k} P_{(j+1)k} + \dots + C_{nk} P_{nk}}, \quad (3)$$

$$F_{\Pi Pi-k} = \frac{F_{\Pi Pi-jk} C_{jk} S_{jk}^2 + F_{\Pi Pi-(j+1)k} C_{(j+1)k} S_{(j+1)k}^2 + \dots + F_{\Pi Pi-nk} C_{nk} S_{nk}^2}{C_{jk} S_{jk}^2 + C_{(j+1)k} S_{(j+1)k}^2 + \dots + C_{nk} S_{nk}^2}, \quad (4)$$

где  $C_{jk}$  – стоимость электроэнергии для ветви  $j$ , выходящей из узла  $k$ .

В случае если с шин какой-либо подстанции питается несколько сторонних потребителей, и граница балансовой принадлежности проходит по шинам подстанции, полученное значение КДВП должно быть поделено между ними пропорционально их нагрузке.

Результаты обхода функцией DetectShareConsumer схемы, показанной на рис. 1, от потребителя П5, приведены на рис. 2.

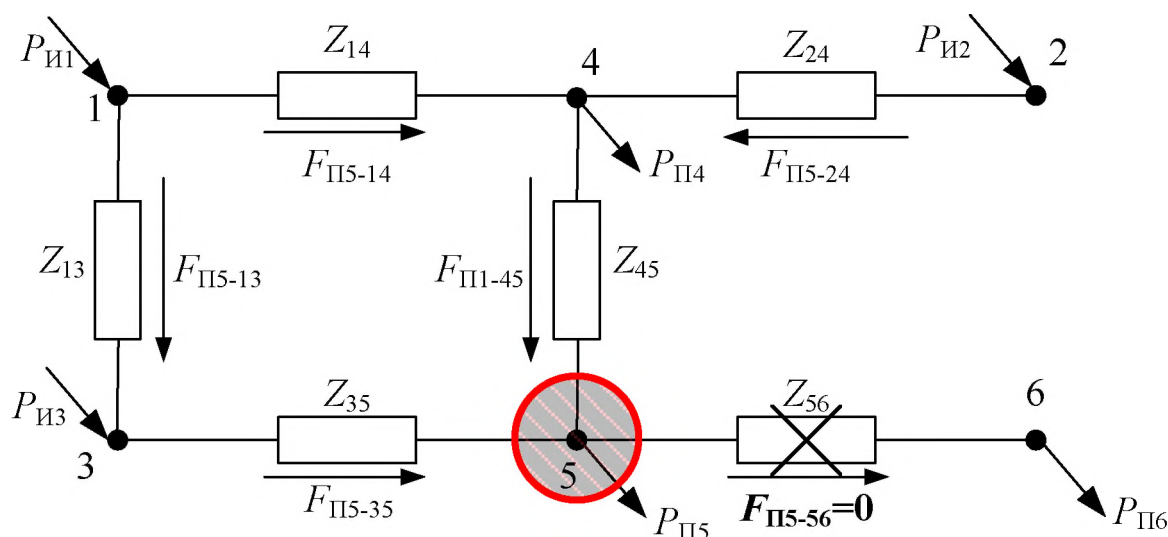


Рис. 2. Результаты обхода схемы от потребителя П5

Полученные по формулам (1), (2) или (3), (4) значения могут быть использованы при разработке мероприятий по совершенствованию нормативов технологических потерь электроэнергии в целях более полной компенсации стоимости потерь со стороны потребителей, присоединенных к сетям территориальной сетевой организации.

### Список литературы

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 457 с.

УДК 621.311.002.5

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Леонид Валерьевич Фетисов<sup>1</sup>, Рустем Фирусович Нуриев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>leonidfetisov@mail.ru

Цель данной работы заключается в исследовании прогнозирования и оценки качества функционирования низковольтных, коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях, а также разработке математических моделей для проведения последующего анализа составляющих потерь электроэнергии в цеховых электрических сетях при учете технического состояния электрооборудования.

**Ключевые слова:** прогнозирования, коммутационные аппараты, цеховые сети, коммутационной стойкости.

# PREDICTION AND EVALUATION OF QUALITY OF FUNCTIONING OF LOW-VOLTAGE SWITCHGEAR USED IN SHOP NETWORKS

L.V. Fetisov, R.F. Nuriev

The purpose of this work is to study the prediction and evaluation of the quality of functioning of low-voltage switching devices used in shop networks, as well as the development of mathematical models for the subsequent analysis of the components of electrical energy losses in shop electric networks, taking into account the technical condition of electrical equipment.

**Keywords:** forecasting, switching devices, shop networks, switching resistance.

Известны различные устройства для фиксации величины коммутационного износа выключателей и устройства для системы диагностики выключателей, которые требуют установку разнообразных датчиков или конструктивных изменений выключателей. Установка датчиков (контактная, то есть на корпус выключателя, или бесконтактная – рядом с корпусом выключателя), монтаж оборудования (проводное или беспроводное) для передачи-приема измерительного сигнала, последующая эксплуатация датчиков – все это связано с разовыми и постоянными затратами, объем которых может сравниться или даже превысит стоимость самого выключателя. Известны способы определения коммутационных ресурсов выключателей, которые также требуют специальных установок и могут применяться у производителей выключателей. Тем более, что они рассматривают цикл «включение-отключение», который в эксплуатации не является тяжелым в отличие от цикла «отключение-включение» при коротких замыканиях.

Из уровня-техники (патенты РФ №2269140, №2303271, №2310879, №2361310 и №2402031) не найдено способа, решающего задачу определения остаточного ресурса выключателей в процессе их эксплуатации без их разрушения или снижения ресурса.

Поэтому была поставлена задача создания доступной, простой технологии определения остаточного ресурса коммутационных аппаратов на основе получения данных аварийных регистраторов и релейных (диспетчерских) служб без использования дополнительного энергозатратного и дорогостоящего оборудования [6].

Это позволяет в эксплуатации получить следующие результаты:

- сократить затраты на определение сработанного и остаточного коммутационного ресурса выключателей в эксплуатации;
- осуществить перевод выключателей на систему технического обслуживания, основанную на оценке их фактического состояния как более экономичную по сравнению с системой планово-предупредительных ремонтов;

- корректировать межремонтные сроки выключателей на основе более точного определения сработанного и остаточного ресурсов аппарата.

Технический результат заявляемого способа достигается тем, что осуществляют фиксацию текущего значения тока коммутации для каждой фазы и вычисляют величину текущего сработанного ресурса каждой фазы выключателя как квадрат отношения текущего и нормального токов.

Вычисленную величину текущего сработанного ресурса суммируют к ранее накопленному сработанному ресурсу выключателя для каждой из фаз. Полученное значение сработанного ресурса высоковольтного выключателя сравнивают с ресурсом по коммутационной стойкости (термин по ГОСТ Р 52565-2006) высоковольтного выключателя для каждой из фаз данного выключателя и, в случае равенства или превышения полученного значения сработанного ресурса, по меньшей мере, для одной из фаз, над установленным ресурсом по коммутационной стойкости аппарата, принимают решение о замене выключателя, а если накопленное значение сработанного ресурса выключателя меньше установленного ресурса коммутационной стойкости, определяют остаточный ресурс [5].

Другими словами, технический результат достигается путем учета конкретных эксплуатационных данных (количество коммутаций, коммутируемые токи в каждой из фаз), которые могут быть получены от релейных (диспетчерских) служб и/или от регистраторов аварийных событий и заявленным в способе порядком оперирования указанными данными [4].

Поскольку установленный ресурс по коммутационной стойкости задается количеством раз отключения максимального тока коммутации, и одно отключение такого тока приводит к срабатыванию (израсходованию) одной единицы ресурса, то отключения с током составляет  $n$ -ю долю (в интервале от нуля до единицы) срабатывания единицы ресурса высоковольтного выключателя или, другими словами, определяет величину текущего сработанного ресурса высоковольтного выключателя.

Остаточный ресурс определяют как разность между установленным ресурсом по коммутационной стойкости коммутационного аппарата и полученным значением сработанного ресурса.

### **Список литературы**

1. Способ определения места однофазного замыкания на землю в разветвленной воздушной лэп с изолированной нейтралью: пат. № 2269140 Рос. Федерация; заявл. 04.11.05; опубл. 20.03.05.

2. Способ статико-импульсного поверхностного упрочнения сферических поверхностей: пат. 2361310 Рос. Федерация; заявл. 15.06.06; опубл. 27.02.08.

3. Грачева Е.И., Сафин А.Р. Исследования эффективности функционирования коммутационных аппаратов // Электрика. 2011. С. 33–56.

4. Дюрягин А.М., Киселёв В.В., Мулюкин К.Н. К вопросу повышения эксплуатационных характеристик систем вторичного электропитания комплексов управления артиллерийских подразделений и формирований // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. № 11–12. С. 58–63.

5. Сираев Л.И., Ильясов И.В., Роженцова Н.В. Применение системы распределенной генерации в промышленных предприятиях // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов Казань, 2016. С. 384–386.

УДК 621.3.019.3

## МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ ПО ПРИЧИНЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

Сергей Дмитриевич Зубков<sup>1</sup>, Игорь Владимирович Коваленко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,  
<sup>1</sup>sergeyccx@mail.ru, <sup>2</sup>ikovalenko@sfu-kras.ru

Рассмотрены вопросы учета человеческого фактора при анализе надежности электроэнергетических объектов. Проведен анализ факторов, влияющих на появление ошибок оперативного персонала, и показана возможность их учета при проведении анализа структурной надежности объектов электроэнергетики.

**Ключевые слова:** надежность, человеческий фактор, модель надежности.

## MODEL OF FAILURES FOR THE REASON OF THE HUMAN FACTOR

S.D. Zubkov, I.V. Kovalenko

The issues of accounting for the human factor when analyzing the reliability of electric power facilities are considered. The analysis of the factors influencing the occurrence of operational personnel errors is carried out and the possibility of taking them into account when analyzing the structural reliability of power industry facilities is shown.

**Keywords:** Reliability, human factor, reliability model.

Неуклонный рост сложности технических средств, повышение ответственности функций, выполняемых ими и их отдельными элементами, расширение диапазона и усложнение условий эксплуатации есть основные объективные причины, которые привели к необходимости постановки проблемы надежности. За короткое время надежность стала ведущей проблемой техники, имеющей общегосударственное значение.

В период становления автоматизации человека стремились заменить автоматическим устройством, и все внимание по обеспечению безотказной работы концентрировали на надежности технических устройств. При этом роль и деятельность человека не учитывались. При дальнейшем развитии автоматизации стало понятно, что заменить полностью подсистему «человек» невозможно. На каждом новом этапе автоматизации остается необходимость сохранения управляемости системы, ее регулирования. Поэтому эффективность и надежность функционирования любой системы зависят от своевременности, точности и безошибочности выполнения возложенных на человека функций при заданных условиях.

Такое изменение взглядов оказало существенное влияние на понимание проблемы надежности. Ввиду этого при анализе надежности реальных технических систем возникла необходимость учета человеческого фактора. При этом отмечается недопустимость оценки поведения оператора с позиций законов функционирования «машины», поскольку в основе регулирования поведения человека лежат психические и физиологические механизмы, отсутствующие у техники рис. 1. [1].

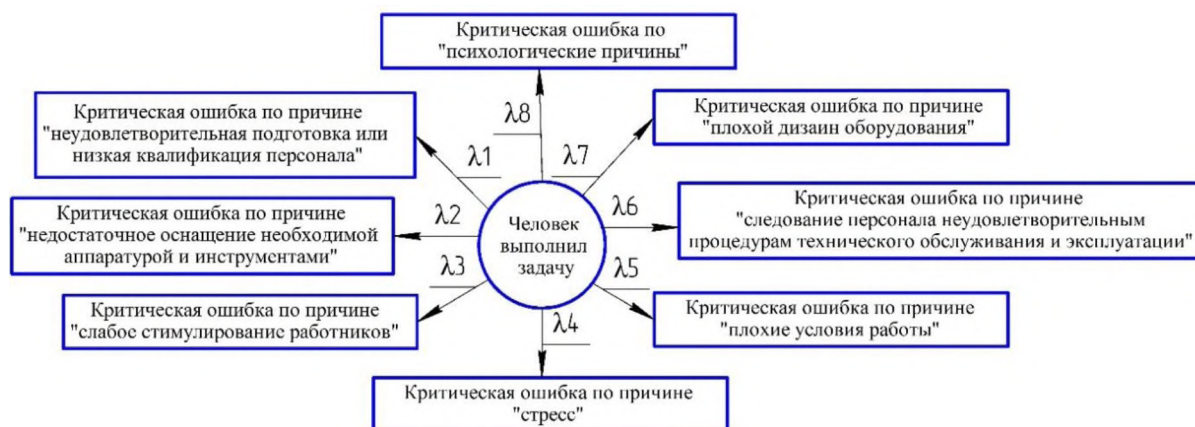


Рис. 1. Факторы, влияющие на появление ошибок человека

Ошибка человека определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций. Показатель надежности действий в таком случае можно определить по формуле [2]:

$$R = R_{\sigma} R_{\text{св}},$$



где  $R_6$  – вероятность безошибочного выполнения совокупности операций (реализации функции);  $R_{св}$  – вероятность своевременного выполнения совокупности операций.

Наиболее вероятными ошибками среди оперативного персонала является невыполнение в полном объеме технических и организационных мероприятий по безопасному выполнению работ, неприменение СИЗ, электрозащитных средств (рис. 2). Данный вид ошибок встречается у всех энергетических компаний и характерен тем, что непосредственно подвергает опасности жизнь и здоровье людей. Возможными причинами для невыполнения в полном объеме технических и организационных мероприятий по безопасному выполнению работ, неприменение СИЗ, электрозащитных средств могут служить все описанные ранее факторы, негативно влияющие на надежность человека.

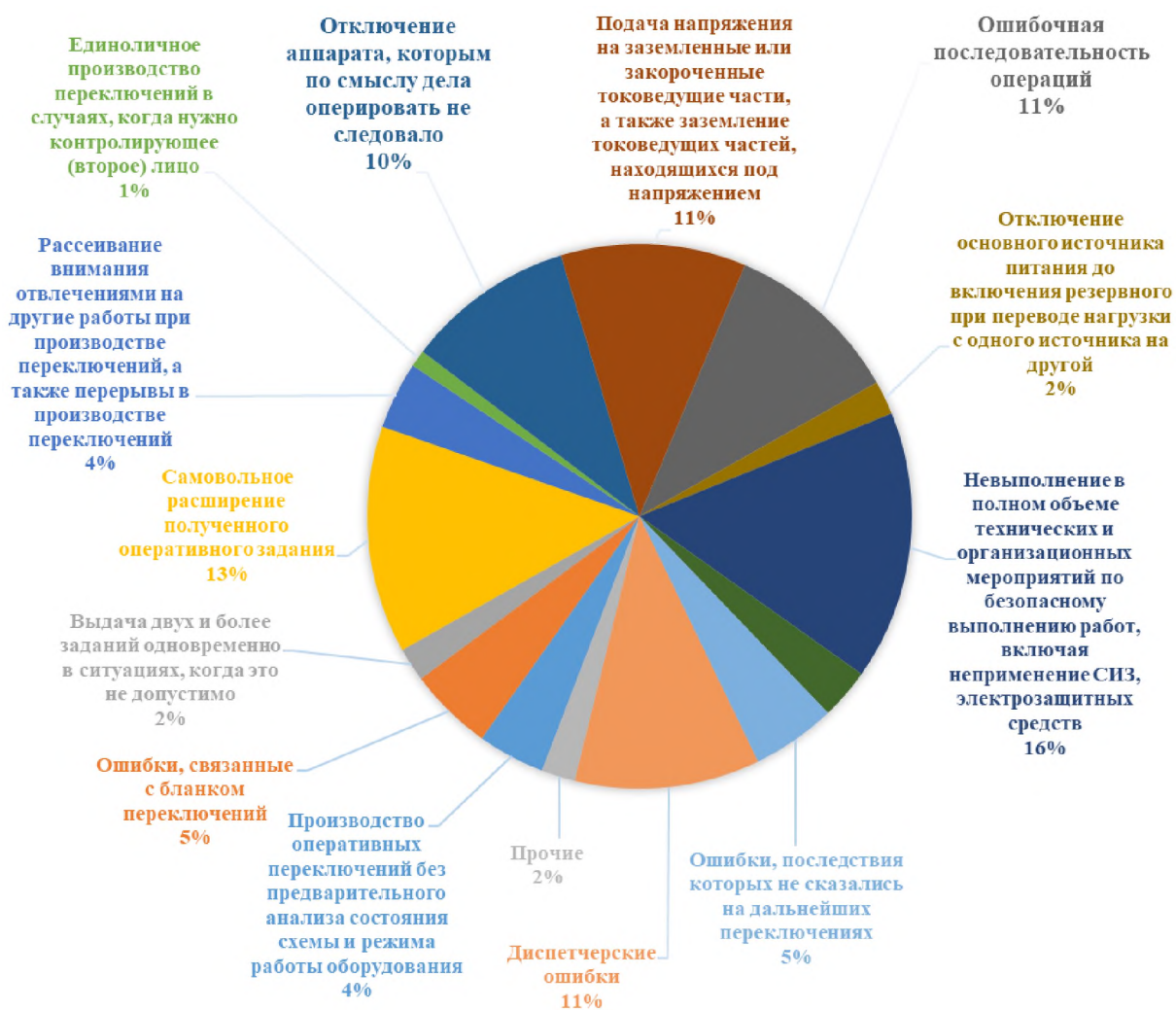


Рис. 2. Распределение ошибок оперативного персонала на виды



Виды ошибок оперативного персонала можно условно разделить на две группы: до 10 % от общей массы ошибок и свыше 10 %.

Большой интерес для анализа представляет вторая группа. В нее входят: диспетчерские ошибки; ошибочная последовательность операций при переключениях; подача напряжения на заземленные или закороченные токоведущие части, а также заземление токоведущих частей, находящихся под напряжением; отключение аппарата, которым по смыслу дела оперировать не следовало; самовольное расширение полученного оперативного задания. Основными причинами данных видов ошибок служит недостаточная проработанность дизайна и эргономики оборудования, плохие условия работы, недостаточная подготовка персонала, психологические причины, стресс и, в гораздо меньшей степени, слабое стимулирование работников, недостаточная оснащенность их инструментом и следование неудовлетворительным процедурам технического обслуживания и эксплуатации. Данная группа возможных ошибок оперативного персонала составляет 56 % от общего числа.

В совокупности с основным видом ошибок по необеспечению технических и организационных мероприятий по безопасному производству работ общая доля составляет уже 72 %. Это означает, что характерные для этих видов ошибок причины, являются основополагающими для модели надежности оперативного персонала.

Оставшаяся группа в общем объеме ошибок составляет 28 %. Основные причины ошибок данной группы – это стресс, недостаток обучения и подготовки персонала, недостатки дизайна и эргономики оборудования. Наименее вероятные: недостаточное оснащение оперативного персонала необходимой аппаратурой и инструментами и недостаточная стимуляция работников.

Интерес представляет также анализ участия вредных для надежности человека факторов в определенных видах ошибок оперативного персонала.

В 14 из 15 возможных видов ошибок присутствуют в качестве возможной причины такие факторы как неудовлетворительная подготовка или низкая квалификация персонала и стресс. Это означает, что каждый из этих факторов, в общем случае, может привести к более чем 93,3 % видам ошибок. Далее располагается фактор: плохой дизайн и эргономика оборудования. Он становится причиной 13 ошибок оперативного персонала из 15 или 86,6 %. Психологические причины нашли свое отражение

в 11 видах ошибок из 15 или 73,3 %. Более 66,6 % занимают плохие условия работы. Иначе говоря, они могут стать причинами 10 категорий ошибок оперативного персонала. К 9 из 15 категориям ошибок может привести следование персоналом неудовлетворительным процедурам технического обслуживания и эксплуатации, в процентном соотношении это 60,0 %. К менее чем половине возможных видов ошибок оперативного персонала могут служить причиной два негативных фактора: недостаточное оснащение необходимой аппаратурой и инструментами – 46,6 % (7 из 15 категорий ошибок) и слабое стимулирование работников – 33,3 % (5 из 15). Наглядное отображение данного анализа представлено на рис. 3.

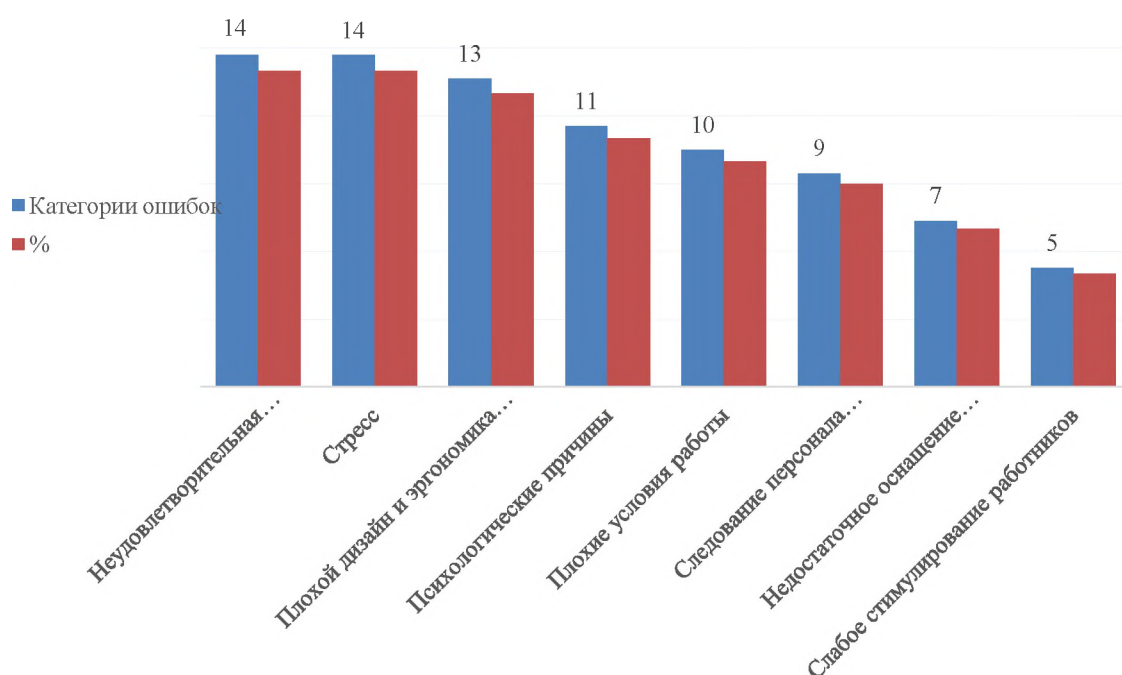


Рис. 3. Диаграмма участия вредных, с точки зрения надежности, факторов в категориях ошибок оперативного персонала

Подавляющее большинство расчетов вероятностей отказов, моделей надежности исходят из оценки конкретных ошибок, свершившихся событий, произошедших отказов.

На основе анализа соответствия ошибок оперативного персонала и негативных факторов, которые к ним могут привести, можно сделать вывод о работоспособности предложенной модели надежности для оперативного персонала.

Исходя из приведенных данных, к основным причинам ошибок оперативного персонала можно отнести:

- неудовлетворительную подготовку или низкая квалификацию персонала;
- недостаточную проработанность дизайна и эргономики оборудования;
- плохие условия работы;
- психологические причины;
- стресс.



Рис. 4. Дерево отказов электроустановки по причине влияния человеческого фактора

Следовательно, появление ошибок по таким причинам более вероятно, а значит и интенсивность отказа по ним должны быть выше тех, ошибки по которым менее вероятны у оперативного персонала. Однако сложность дальнейшего применения модели, представленной на рис. 4, не ограничивается лишь присвоением определенных числовых значений для интенсивности отказа с учетом определенного фактора. Поскольку приведенная выше статистика показывает общую картину, требуется изучение влияния конкретных факторов на надежность оперативного персонала конкретного предприятия. В каждом отдельном случае (конкретная электроустановка и оперативный персонал, обслуживающий ее) интенсивности отказов будут отличаться в зависимости от преобладающих факторов (причин ошибок). В таком случае необходим анализ статистики аварийности по вине оперативного персонала конкретного предприятия. Это возможно далеко не всегда, в каком-то случае отсутствует достаточный объем накопленных

данных в виду «молодости» предприятия, не все собственники проводят расследования аварий, их анализ, а большинство старается всеми способами не отражать подобное в документах, доступных для широкой общественности.

### Список литературы

1. Машин В.А. О нарушениях в работе атомных станций, обусловленных человеческим фактором // Электрические станции. 2012. № 3. С. 9–15.
2. РНД 73-16-90. Методика по расчету показателей надежности системы оповещения о пожаре и управления эвакуацией людей при пожаре. Новосибирск, 1990. С. 5–12.

УДК 621.31

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛУЧШЕНИЯ ДВУХТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПОМОЩЬЮ ПРОДОЛЬНОГО РЕБРА

Наиль Фарирович Тимербаев<sup>1</sup>, К.А. Асаад<sup>2</sup>, Омар Абдулхади Мустафа Алмохаммед<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>cpekgeu@gmail.com, <sup>3</sup>omeralhayaly1@yahoo.com

В статье приведено математическое моделирование двухтрубного теплообменника, в котором используется вода в качестве рабочей жидкости. Диаметр внешней трубы 34,1 мм, а диаметр внутренней трубы 16,05 мм. Толщина стенок труб составляет 1,5 мм, а длина системы 1 м. Горячая вода течет через внутреннюю трубу параллельно с холодной водой, которая проходит через внешнюю трубу. Температура горячей и холодной воды на входе составляет 75 и 30 °С соответственно. Массовый расход внутри центральной трубы составляет 0,1 кг/с, а кольцевая труба несет 0,3 кг/с. В исследование проведено сравнение теплообменников с продольными ребрами на внешней поверхности внутренней трубы и без них в одних и тех же условиях. Для анализа системы используется компьютерная программа Ansys Workbench 15.0.

**Ключевые слова:** ребро, теплообменник, теплообмен, численное исследование, потеря давления, тепlopоступлений.

### NUMERICAL STUDY ON THE DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER IMPROVING BY LONGITUDINAL FIN

N.F. Timerbaev, K.A. Asaad, O.A.M. Almohammed

Mathematical simulation performed on a double pipe heat exchanger which has water as a working fluid. The outer tube diameter is 34.1mm while the inner tube diameter is 16.05mm. The tubes wall thickness is 1.5mm and the model length was 1 m. The hot water is flowing through the inner tube in parallel with the cold water that passing the outer tube. The hot and cold water temperature at the inlet is 75 and 30°C respectively. The mass flow

rate inside the central pipe is 0.1 kg/s while the annular pipe carrying 0.3 kg/s. The study will make a comparison between models that use longitudinal fins on the outer surface of the internal tube and other without fins in the same conditions. A certain computer program used for system analysis which is Ansys workbench 15.0.

**Keywords:** fin, heat exchanger, heat transfer, numerical study, pressure loss, heat gain.

Heat is a form of energy that commonly known as a thermal energy. As other types, it can be carried from place to other or from a body to bodies which in contact with [1]. Heat-exchanger is a term used with the device that acts a role in heat transfer [1]. It may take several shapes; one of them is the double-pipe heat exchanger which consists of a smaller size tube inserted inside the bigger tube. Each one of them contains fluid differently in temperature from the other to induce heat flowing from hot side to colder [1].

In present work, changing of inner tube surface on heat exchanger performance in case of parallel fluids flow is studied numerically. Longitudinal fin is one of the passive methods that improve the heat transfer in double pipe heat exchanger to reduce its size [2]. Chen et al. [3] improve heat exchanger by dimples on the inner tube. Liao et al. [4], Bhuiya et al. [5] and Eiamsan et al. [6] used twisted perforated tape supported on circular tube to induce more amount of heat to transfer.

$K$ -epsilon ( $k$ - $\epsilon$ ) model is commonly used in Computational Fluid Dynamics (CFD). In the most cases, turbulent flow conditions applied in the simulation of the flow characteristics. Two variables must take into account to determine the energy in the turbulence. The first is turbulence kinetic energy ( $k$ ) and the second is turbulence dissipation ( $\epsilon$ ). The first is a measure of energy level in the fluid while the second shows the loss in that level [7].

The double pipe heat exchanger under study consists of two concentric tubes. The inner and outer diameters of the inner tube are 16,05 mm and 19,05 mm, and the inner and outer diameters of the bigger tube are 34,1 mm and 38,1 mm respectively. The length of the heat exchanger is 1000 mm.

This study investigates effect of varying the outer surface area of the inner tube, so that; a given number of fins are added to the outer surface area of the inner tube, to increase the contact area. The performance and the initial cost of heat exchanger with and without fins are compared.

Adding fins to the outer surface area of the inner tube reducing the space between the two concentric tubes, so, it is expected that the fluid pressure drop increase. Therefore, this variable should be taken in the consideration to reach the optimum design of the heat exchanger.

Six geometries of inner tube are studied; the number of fins for the first four geometries ranging from 4 to 10 fins, with an increment of 2 fins. While, the fifth and the sixth geometries consist of 13 and 16 fins, respectively. The thickness of the fin is kept constant at 2 mm. Two height of fin are studied, the first one is 3 mm and the second is 6 mm. Figures 2 and 3, as well as table show the number and the dimensions of the fins.

The amount of metal used in manufacturing of the tube depends on its geometries, as well as the number of fins. That mean, the finned tube needs more metal as compared with that has no fins. In this work, the amount of metal that used in in manufacturing the heat exchanger is taken as initial cost indicator. The model is fully made of copper. The mass of additional metal can be calculated from multiplying of fins volume by copper density.

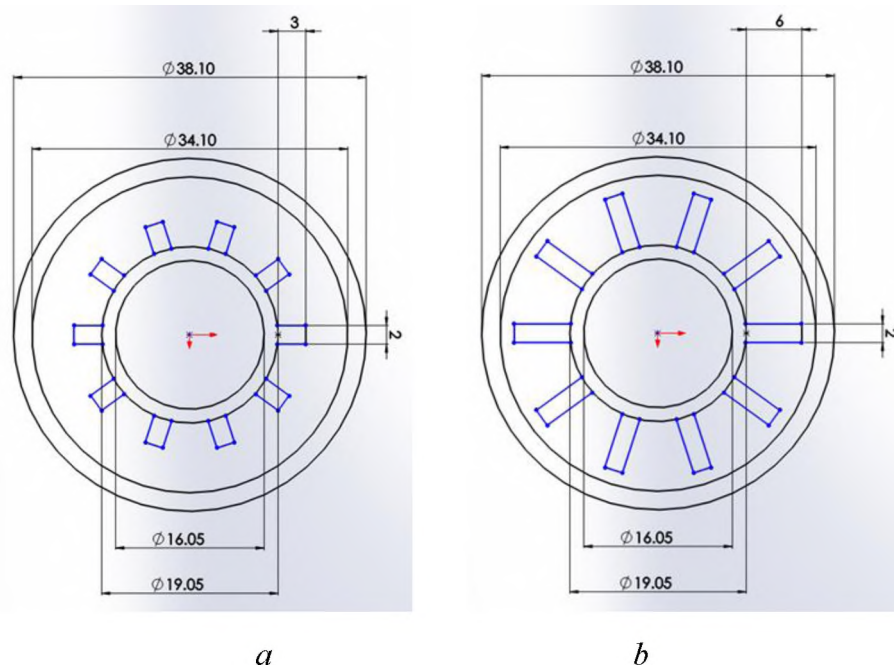


Fig. 1. *a* – fins height is 3 mm; *b* – fins height is 6 mm

In first group of the test, the height of the fins is kept constant at 3 mm, and the range of fins number is 4 to 16, as mentioned above. While, in the second groups of test, the height of the fins is changed to 6 mm, for the same range of the fins number. Fig. 1 (a) shows a heat exchanger with 10 fins of height 3 mm. and Fig. 1 (b) is a model with 10 fins which has a height of 6 mm that exposed to computational analysis.

In heat exchangers, the fluid flow either in parallel or counter. The present attempt is to check system performance in parallel flow. The inner tube allows hot water flowing through, while the outer contain the cold one. The design

is based on water velocity which must not less than 0,5 m/s and not exceeds 1,5 m/s. To achieve that condition, the mass flow rate of hot and cold water were 0,1 kg/s and 0,3 kg/s respectively.

The method of meshing arrangement in Ansys workbench 15,0 was used for meshing the models as shown in the fig. 2.

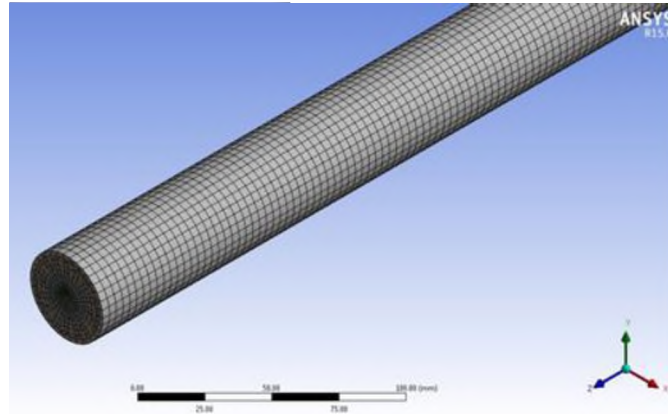


Fig. 2. Computational meshing

The number of elements in the model were 500000 elements. This number chooses after the quality of the elements tested. When there is no changing in the results of the program and its outputs that mean the number of the elements are enough to do the study. The results of the program are not relatively changed when the number of the elements increased from 500 000 to 1 000 000, so that; the first selection gives the same results and the shorter time taken by the program.

Pure water is used as a working fluid. The density of water is  $998,2 \text{ kg/m}^3$  and specific heat is  $4182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . The hot water enters to the central tube at the temperature of  $75^\circ\text{C}$  while the cold water enters the annular tube at the temperature of  $30^\circ\text{C}$ . The important input data to the program are shown in the following table.

Input data to the program

| Test group | Fin height (mm) | Fins No. | Test group | Fin height (mm) | Fins No. |
|------------|-----------------|----------|------------|-----------------|----------|
| 1          | 3               | without  | 2          | 6               | without  |
|            |                 | 4        |            |                 | 4        |
|            |                 | 6        |            |                 | 6        |
|            |                 | 8        |            |                 | 8        |
|            |                 | 10       |            |                 | 10       |
|            |                 | 13       |            |                 | 13       |
|            |                 | 16       |            |                 | 16       |

Fig. 3 shows the effect of fins numbers and height on the pressure drop through the heat exchanger. The relation between pressure drop in the annual channel and numbers of fins gives the indication about the power loss during the tube shape changing.

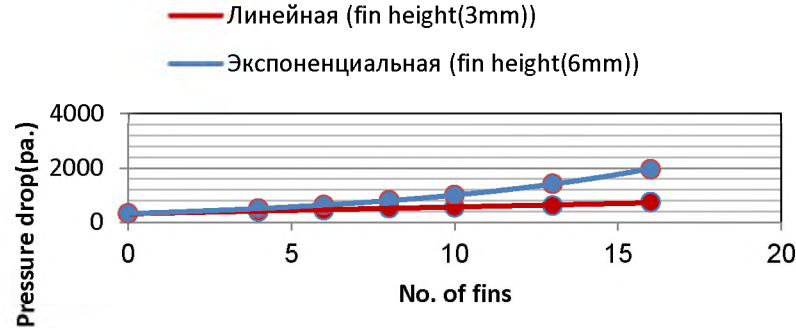


Fig. 3. The relation between pressure drop and number of fins

As shown, the relation between pressure drop and the number of fins, when the fin height is 3 mm is a leaner relation, and can be simulated by the equation below:

$$\partial p = 25,835n + 302,86, \quad (1)$$

where  $\partial p$  – the pressure drop, pa;  $n$  – number of fins.

While, for the fin height of 6 mm, the relation is an exponential relation, as illustrated in the following equation:

$$\partial p = 322,88 e^{0,1115n}. \quad (2)$$

To cause flowing of any fluid, it needs mechanical energy to that purpose [8]. The friction with tube walls will resist that process and dissipate energy. The loss in power can be determined by the following:

$$P = \frac{\dot{m}}{\rho} \Delta p, \quad (3)$$

where  $\dot{m}$  – mass flow rate of water, kg/s;  $\rho$  – mass density, kg/m<sup>3</sup>.

The difference in cold water temperature refers to the heat exchange between the two fluids. The rate of heat exchange between the two fluids can be calculated as follows:

$$Q = \dot{m} c_p \Delta t, \quad (4)$$

where  $Q$  – the heat transfer, w;  $c_p$  – specific heat, kJ/kg·C;  $\Delta t$  – temperature difference, C.



The aim of fin adding to the heat exchanger is to raise heat gain which is a function of the surface area which in contact with the working material. Increasing of fins number will affect the amount of heat delivered. The relation between them is clearly shown in the equations (5&6) which resulted from curves in the fig. 4 for first and second situations respectively.

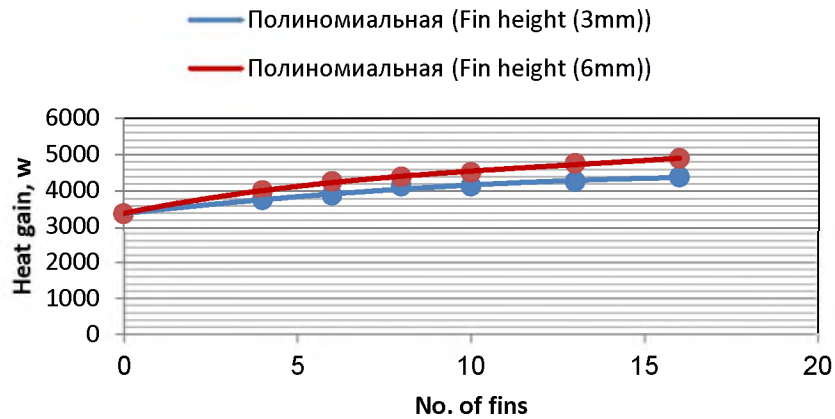


Fig. 4. Heat gain

$$Q = -2,77n^2 + 106n + 3387,3; \quad (5)$$

$$Q = 0,263n^3 - 10,4n^2 + 193,83n + 3390,4. \quad (6)$$

1. As the number of fins increases the pressure drop increases also, for the both fins height. Also, the fin height negatively effects on the pressure drop. The increase in pressure drop is due to the reduction in the space between the two tubes.

2. The heat gains directly proportion with the number of fins.

3. Double pipe heat exchanger improving by using of longitudinal fins is depended on the profit in thermal energy delivered to the working material.

4. Contact area increment will resist fluid flowing which lead to need more of mechanical energy to cause its flowing in the same rate.

### References

1. Yunus A.Ç. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. Highes Education. 2 not ed. P. XVIII. 1. 668 p.
2. Timerbaev N.F., Almohammed O.A. M., Ali A.K. Longitudinal Fin Effect on Effectiveness of Double Pipe Heat Exchanger // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering. 2018. Ch. 63.
3. Chen J., M<sup>u</sup>ller-Steinhagen H., Duffy G. Heat transfer enhancement in dimpled tubes // Applied Thermal Engineering. 2001. 21(5). P. 535–547.

4. Liao M., Xin D. Augmentation of convective heat transfer inside tubes with 3-d internal extended surfaces & twisted tape inserts // Chemical Engg. 2000. 78(2). P. 95–105.
5. Bhuiya M., Chowdhury M. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013. 46. P. 49–57.
6. Eiamsa S., Eiamsa P., Thianpong C. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tape // Experimental thermal & fluid science. 2009. 34(1). P. 53–62.
7. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // The Finite Volume Method. 2007. P. 80.
8. Munson R., Donald F., Okiishi H. Fundamentals of Fluid Mechanics // 4/e. Ch. 12. 759 p.

УДК 621.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Татьяна Геннадьевна Галиева<sup>1</sup>, Марат Фердинандович Садыков<sup>2</sup>,  
Дмитрий Алексеевич Иванов<sup>3</sup>, Данил Александрович Ярославский<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>79534929817@ya.ru, <sup>2</sup>sadykov@kgeu.ru, <sup>3</sup>divanale@gmail.com, <sup>4</sup>fbox52@gmail.com

В настоящее время в связи со значительной протяженностью воздушных линий электропередач и увеличением аварийных ситуаций становятся всё более востребованы работы над технологиями в области увеличения надежности сетей. В данной работе проводится обзор методов и средств диагностики состояния линий электропередач (механический, магнитный, частотный, оптический, термодинамический, комбинированный). Рассматриваются их достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередач, диагностика, мониторинг, гололёдообразование, аварийные ситуации, методы диагностики, средства диагностики.

## STUDY OF METHODS AND MEANS OF DIAGNOSTICS OF THE CONDITION OF ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

T.G. Galieva, M.F. Sadykov, D.A. Ivanov, D.A. Yaroslavsky

At present, due to the large length of overhead power lines and the increase in emergency situations, work in the field of network reliability is in demand. In this paper, we review the methods and means of diagnosing the state of power lines (mechanical, magnetic, frequency, optical, thermodynamic, combined). Their advantages and disadvantages are considered.

**Keywords:** overhead power lines, diagnostics, monitoring, icing, emergency situations, diagnostic methods, diagnostic tools.

В настоящее время одной из основных проблем электроэнергетической отрасли в России и за рубежом является обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей. Воздушные линии (ВЛ) электропередач являются наиболее аварийным элементом в составе единой технологической цепи снабжения потребителей электроэнергией. В Российской Федерации это обусловлено большой протяженностью линий, прохождением в различных географических зонах, а также воздействием внешних неблагоприятных климатических факторов в совокупности с физическим износом. В процессе эксплуатации опоры ЛЭП подвергаются механическим деформациям от воздействия ветра и оледенения проводов. Причиной аварий на линиях от гололедно-ветровых нагрузок является недостаточная информационно-измерительная система мониторинга.

В РФ чаще всего мониторинг ВЛ производится вручную – с помощью осмотра линий бригадами техников. Помимо визуального осмотра существуют различные методы диагностики технического состояния ВЛ, классифицируемые по контролируемому параметру [1, 2]: механический, магнитный, частотный (локационный), оптический, термодинамический (метеорологический), комбинированный.

Первый метод, который мы рассмотрим, является наиболее объективным в определении механической нагрузки на провод – механический метод. В данном методе измеряется вес пролетов провода ВЛ, и масса определённого участка обуславливается нагрузками от гололеда и ветра.

В данном методе используются датчики двух видов: контактные и бесконтактные. Контактные датчики обладают рядом недостатков: сложная конструкция и ненадежность, вызванная наличием механических деталей, склонных истираться в процессе работы, а также многие датчики имеют плохую чувствительность в момент начала гололедообразования. Бесконтактные датчики в данном методе являются более надежными.

Кроме того, механические датчики являются неуниверсальными, каждый датчик необходимо настраивать вручную для каждой линии (длина пролета между опорами, диаметр и количество проводов в фазе, количество и габариты изоляторов).

Второй рассматриваемый метод – это магнитный. Имеется несколько вариаций исполнения устройств, работающих по принципу магнитного метода:

- 1) реакция на изменение магнитного поля провода при нарастании на нём гололёдных отложений (изменение фиксируется индукционным датчиком);

2) преобразование величины механических напряжений в ферромагнитных материалах в частоту следования прямоугольных электрических импульсов;

3) измерение гололедно-ветровой нагрузки на ВЛ. Устройства содержат магнитоупругий датчик силы, подвешенный между траверсой опоры и изоляторов с фазным проводом и контролирующий полную нагрузку на воздушную линию электропередачи.

Если параметры окружающей среды меняются, то датчик неверно определяют уровень гололедных отложений, так как измерение проводится непосредственно около устройства, а определить уровень гололедных отложений по всему пролету нет возможности.

В локационном методе импульсный сигнал подается на ВЛ, и замеряется время, за которое сигнал распространится вдоль линии, отразится от конца линии или высокочастотного заградителя и вернется в исходную точку.

Локационный метод позволяет определить наличие и уровень гололедных отложений на проводах ВЛ за счет сравнения времени распространения сигналов (или амплитуд отраженных сигналов) при наличии и при отсутствии гололеда на линиях. Метод имеет две используемые характеристики: снижение скорости и уменьшение амплитуды сигнала.

Главным преимуществом метода является возможность расположения аппаратуры на подстанции и отсутствие необходимости установки на ВЛ различных устройств. Недостатком локационного метода является отсутствие возможности определения ветровых нагрузок на провод ВЛ.

В оптическом методе для построения систем регистрации и предупреждения возможности образования гололеда используют в устройствах в качестве датчиков оптическое волокно, по которому на фотоприемник поступает световой поток, испускаемый светопередатчиком. При наличии гололедных отложений световой поток слабый, при отсутствии – поток ослабляется незначительно.

Гололедные отложения на проводах ВЛ могут образовываться только при определенных условиях: температуре воздуха, влажности воздуха и снижении температуры провода ниже точки росы и точки десублимации. Термодинамический метод аналитическим путем прогнозирует образование гололеда с помощью измеренных параметров.

Термодинамический метод имеет недостатки, выраженные в загроможденности метода математическими вычислениями, необходимостью составления таблиц значений точек росы и точек десублимации для каждого конкретного участка местности, что затрудняет его использование.

В инклинометрии для измерения угла провиса используются датчики для измерения ускорения (акселерометры), либо датчики, непосредственно измеряющие угол (инклинометры). Часто в таких системах используются МЭМС-датчики. Такие датчики имеют высокую надежность и способность обеспечивать стабильные показания даже в жестких условиях окружающей среды.

Исходя из анализа методов диагностики линий электропередач на наличие гололедных отложений, механический метод является самым надежным, но для его реализации необходимо вмешиваться в конструкцию линейной арматуры. Оптические и магнитные методы подвержены помехам от грязи и птиц и считаются малонадежными.

В связи с проведенным анализом с целью повышения надежности и достоверности предлагается разработка датчика мониторинга механических нагрузок ВЛ с применением нескольких методов: инклинометрического, локационного и термодинамического.

На данный момент учеными КГЭУ разработана и проходит опытную эксплуатацию система оперативного мониторинга технического состояния ВЛ [1, 3–7]. Система совмещает в себе два метода: метод угла провиса и метеорологический метод.

Устройствами системы проводятся измерения следующих параметров: температуры провода и окружающей среды, относительную влажность воздуха, угол наклона устройства, угол поворота устройства вокруг оси провода, среднеквадратичное виброускорение, силу тока в проводе.

Система оперативного мониторинга технического состояния ВЛ включает в себя разрабатываемые устройства [5, 6], устанавливаемые на проводах ВЛ, передающие информацию друг через друга и питающиеся непосредственно от линии.

На основе данных измерений можно определить механическое напряжение в точке подвеса, толщину стенки гололёда, а также «пляску» провода.

Для системы оперативного мониторинга технического состояния ВЛ было разработано программное обеспечение управления и приема-передачи данных по беспроводному каналу.

Увеличить достоверность имеющейся системы возможно с помощью локационного метода, который позволит проводить анализ условий распространения высокочастотного сигнала по проводам и тросам.

В работе были рассмотрены известные методы диагностики ВЛ. Выявлено, что применение трех методов (локационный, инклинометрический и метеорологический) позволит разработать наиболее надежную и достоверную систему определения технического состояния ВЛ, так как недостатки каждого из методов будут компенсироваться другими методами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00203.

### Список литературы

1. Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors / D.A. Yaroslavsky [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. № 12(22). 2017. P. 6479–6482.
2. Панасенко М.В. Аналитический обзор способов и устройств мониторинга промежуточного пролета воздушной линии электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11-4. С. 572–576.
3. Investigations of topological features of construction an intelligent overhead power transmission line based on wireless sensors / D.A. Ivanov [et al.] // International journal of mechanical engineering & technology. № 8(12). P. 903–908.
4. Методика мониторинга гололедных отложений на проводах ВЛ с учетом разрегулировки линейной арматуры / Д.А. Ярославский [и др.] // ИВУЗ. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 5–6. С. 89–97.
5. Иванов Д.А., Савельев О.Г., Садыков М.Ф. Датчик системы мониторинга гололедно-ветровой нагрузки // Интеллектуальные энергосистемы труда: сб. матер. IV Междунар. молод. форума. Томский политехнический университет. 2016. С. 138–140.
6. Иванов Д.А., Савельев О.Г., Мисбахов Р.Ш. Система мониторинга и количественного контроля гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: сб. матер. IV Всерос. молод. науч. школы-конференции. Томск, 2016. № 2. С. 334–336.
7. Создание платформы для «Умных сетей» с использованием беспроводных технологий / Д.А. Иванов [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи 2017: сб. матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Томск, 2017. С. 359–360.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Леонид Валерьевич Фетисов<sup>1</sup>, Гулфия Азаматовна Аманова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>leonidfetisov@mail.ru, <sup>2</sup>amanova.gulfiya@mail.ru

Развитие электроэнергетической отрасли в настоящее время требует новых методов решения существующих проблем. Одним из них является внедрение распределенной генерации различными потребителями электроэнергии. В статье рассмотрена целесообразность ее использования и потенциал развития в будущем.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, электроэнергия, собственная генерация, электроустановки, электроснабжение, автономный источник.

## PROSPECTS FOR THE USE OF DISTRIBUTED GENERATION

L.V. Fetisov, G.A. Amanova

The development of the electricity industry currently requires new methods to solve existing problems. One of them is the introduction of distributed generation by various consumers of electricity. The article considers the feasibility of its use and the potential for future development.

**Keywords:** distributed generation, electric power, own generation, electrical installations, power supply, autonomous source.

Единая электроэнергетическая система (ЕЭС) России создана более 60 лет назад и на данный момент нуждается в существенной модернизации и обновлении основных фондов. Необходима замена практически 50 % физически и морально устаревшего оборудования, применение новых технологий, информационно-диагностических систем и систем управления.

Реструктуризация электроэнергетики, рыночные условия функционирования вносят свои особенности и проблемы. В наше время наблюдается тенденция создания клиенто-ориентированной электроэнергетики, существенное повышение надежности электроснабжения потребителей, а также привлечение их к участию в регулировании режимами работы энергосистемы. Необходимо внедрение нового энергоэффективного оборудования и новых технологий, гарантирующих снижение издержек при производстве и передаче электроэнергии, снижение уровня потерь, оптимизация объема и размещения резервных мощностей.

В минувшее десятилетие ведущие страны мира развивают технологию Smart Grid (интеллектуальная сеть). Существует уже немалое количество пилотных проектов, где применение «умных счетчиков», «умных лифтов»

и др., использование солнечной и ветровой энергии в сочетании с «умными домами» дают потребителю значительную выгоду в оплате за услуги энергетических организаций. В свою очередь электроснабжающие предприятия получают положительный эффект за счет сглаживания пиковых нагрузок и уменьшения потерь [1].

Одной из концепций интеллектуальной энергетической системы является внедрение микросетей, представляющих собой источники распределенной генерации с накопителями энергии и контролируемой нагрузкой. Основным элементом распределенной генерации является малая энергетика, технологии которой предназначены, как правило, для установок малой мощности (до 25 МВт), в том числе возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Большинство электроустановок распределенной генерации основано на сжигании природного топлива. К таким относятся газотурбинные установки (ГТУ), парогазовые установки (ПГУ), газопоршневые агрегаты и другие установки. Возобновляемые источники энергии используют малые гидроэлектростанции, ветряные электростанции, солнечные электростанции, фотоэлектрические установки, гибридные установки. Тепловые насосы используют низкопотенциальное тепло для теплоснабжения и холодоснабжения. Атомные электростанции как автономные источники электрической и тепловой энергии используются, как правило, в изолированных энергорайонах [2].

Источники распределенной генерации имеют разные технические характеристики и разную экономическую эффективность. Так, например, двигатели на газовом топливе (микротурбины, газотурбинные установки, газопоршневые двигатели внутреннего сгорания, парогазовые установки малой мощности) выделяются высоким качеством и эффективностью энергоснабжения.

Распределенная генерация используется:

- в качестве автономных источников электроэнергии, тепла (в режиме когенерации) и холода (в режиме тригенерации);
- для снятия пиковых нагрузок в режимах параллельной работы с системой централизованного энергоснабжения;
- в проектах когенерации и тригенерации, основанных на использовании альтернативного топлива: биогаза, попутного нефтяного газа, шахтного метана и других видов [3].



На базе автономных источников энергии распределенную генерацию могут использовать промышленные мероприятия, офисные центры, объекты социальной инфраструктуры, для которых по тем или иным причинам недоступно централизованное технологическое присоединение. К таким причинам относятся: территориальная удаленность объектов, дефицит установленной мощности в регионе, ограниченная пропускная способность сетевой инфраструктуры [6]. Кроме того, централизованное электроснабжение может быть экономически неэффективно (высокая цена за присоединение, высокие тарифы, другие причины). Вследствие этого новые или реконструируемые средние и малые предприятия различных отраслей все чаще выбирают распределенную генерацию в качестве альтернативы присоединения к сетям энергосистемы страны [4].

О развитии распределенной энергетики в России свидетельствует рост числа предприятий, принимающих решение о строительстве собственной генерации. Ее востребованность обусловлена соображениями экономической целесообразности и, что немаловажно, требованиями экологического законодательства (это непосредственно касается нефтегазовой отрасли). Наличие собственных энергоресурсов, отдаленность многих месторождений от источников большой генерации и сетей дает основания для создания собственной генерации нефтеперерабатывающим предприятиям, которые при этом получают возможность снижения расходов на приобретение энергоресурсов, параллельно решая проблему утилизации отходов.

На привлекательность распределенной генерации также оказывает влияние динамика цен на мощность (в 2017 г. здесь произошел существенный скачок), динамика роста тарифов на услуги по передаче электроэнергии (здесь имеется стабильный фактический рост) [5]. Так складываются ситуации, при которых выгоднее построить свою генерацию на основе природного газа, который остается относительно дешевым (изменение цен на него в перспективе достаточно прогнозируемо).

Рассмотрим возможность использования распределенной генерации для малых нефтеперерабатывающих предприятий, удаленных от централизованного электроснабжения. Необходимо учесть, что такие предприятия относятся к 1 категории надежности по электроснабжению, и генерирующие установки должны иметь резерв на случай непредвиденных обстоятельств. Они могут использовать в качестве топлива попутный газ.

Известно, что на 1 кВт·ч электроэнергии приходится:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж};$$

$$1 \text{ МДж} = 1/3,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 0,278 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

т. е. 1 кВт·ч потребленной энергии равен 3,6 МДж тепла. Допустим 1 кВт·ч электроэнергии стоит 4,5 руб. Удельная теплота сгорания (низшая) природного газа равна 32,7 МДж/м<sup>3</sup>. Значит 1 м<sup>3</sup> природного газа при сгорании выделит 32,7 МДж или 9,09 кВт·ч энергии. КПД хорошего газового котла составляет примерно 90 %, т. е. потребляя 1 м<sup>3</sup>, получаем

$$9,09 \cdot 0,9 = 8,18 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 29,4 \text{ МДж}.$$

Принимая цену за 1 м<sup>3</sup> газа, равной 4,6 руб. получаем, что при потреблении 1000 кВт·ч электроэнергии по тарифу на розничном рынке электроэнергии ее стоимость составит: 1000 кВт·ч · 4,5 руб./кВт·ч = 4500 руб. Однако при получении электроэнергии от собственной генерации путем сжигания газа на ПГУ (ГТУ) стоимость тех же 1000 кВт·ч электроэнергии составит:

$$\frac{1\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{8,18 \text{ кВт}} \cdot 4,6 = 562,3 \text{ руб}.$$

Таким образом, мы видим очевидную разницу между платой за электроэнергию по тарифу и при ее генерации на собственной установке. Учитывая доступность газа и ее относительную дешевизну в нашей стране, приходим к выводу, что распределенная генерация, основанная на ПГУ (ГТУ), имеет большой потенциал развития в наше время и ближайшем будущем.

### Список литературы

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. URL: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf).
2. Рудаков А.И., Нуриахметов И.Б. Современные направления повышения эффективности минигэс малых автономных предприятий // Научные исследования XXI века: теория и практика: сб. матер. Междунар. (заочной) науч.-практ. конф. 2018. С. 126–130.
3. Актуальность применения биогазовых установок в России и за рубежом / Б.Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 2(44). С. 71–74.

4. Набалдьян Г.Г., Жолнерчик С.С. Ключевые факторы эффективного применения технологий распределенной генерации в промышленности // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 1. С. 80–86.

5. Сираев Л.И., Ильясов И.В., Роженцова Н.В. Применение системы распределенной генерации в промышленных предприятиях // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. Казань, 2016. С. 384–386.

6. Иванова В.Р., Иванов И.Ю. Разработка критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации активно-адаптивных электроэнергетических систем // Высокие технологии и инновации в науке: матер. Междунар. науч. конф. Казань, 2018. С. 112–115.

УДК 656.07

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Дмитрий Владимирович Гришук<sup>1</sup>, Максим Владимирович Венюков<sup>2</sup>,  
Роберт Накибович Хизбуллин<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>dmitriigrishuk@gmail.com, <sup>2</sup>maks\_venyukov@mail.ru, <sup>3</sup>robert.khizbullin@mail.ru

В настоящее время по всему миру наблюдается все больший интерес к развитию электрического транспорта, связанный с ратификацией многими странами Киотского протокола: строительству новых систем и восстановлению закрытых ранее, поскольку с ходом времени пришло понимание экологических преимуществ их использования, особенно в больших городах. Электрические транспортные средства отличаются от транспорта на двигателях внутреннего сгорания полным отсутствием вредных выбросов непосредственно на борту, кроме того грамотная организация их эксплуатации в качестве общественного транспорта может разгрузить города от пробок и экономить бюджетные средства муниципалитетов за счет большей энергоэффективности по сравнению с традиционными бензиновыми и дизельными автобусами. Максимальную экономию можно достичь, используя новейшие принципы энергосбережения, речь о которых пойдет в статье.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, трамвай, троллейбус, метрополитен, инфраструктура, энергосбережение.

## ENERGY SAVING AT THE URBAN ELECTRIC TRANSPORT COMPANIES

D.V. Grischuk, M.V. Venyukov, R.N. Khizbulin

At present, there is a trend towards the development of electric transport around the world related to the ratification by many countries of the Kyoto Protocol: the construction of new systems and the restoration of previously closed ones, since with the passage of time an understanding of the advantages of using them has come, especially in large cities. Electric

vehicles differ from vehicles with internal combustion engines by the complete absence of harmful emissions; in addition, the competent organization of their operation as a public transport can relieve cities from traffic jams and save budget funds of municipalities due to greater energy efficiency compared to traditional gasoline and diesel buses. Maximum savings can be achieved using the latest principles of energy saving, which will be discussed in the article.

**Keywords:** electric transport, tram, trolleybus, metro, infrastructure, energy saving.

Основная часть затрат электроэнергии на предприятиях электрического транспорта – электрическая тяга подвижного состава, ее значение может достигать 90 % в общей картине расходов энергоресурсов [1]. Следовательно, именно этот параметр нуждается в оптимизации.

Наиболее часто в качестве системы управления частотой вращения электродвигателя используется реостатно-контакторная, в России ею оснащены более 65 % единиц электротранспорта (всего по состоянию на 2016 год в стране порядка 8,1 тыс. трамвайных вагонов, 10,4 тыс. троллейбусных, 7,1 тыс. вагонов метрополитена) [2]. Такая система управления отличается относительной простотой реализации и надёжностью, поэтому ранее применялась повсеместно с конца XIX века в машинах, где требовалось плавно изменять количество оборотов. Но основной ее недостаток – низкая энергоэффективность, поскольку энергия двигателя, высвобождающаяся при торможении вагона, вынуждена рассеиваться на реостатах и «греть воздух».

Поэтому с распространением силовых электронных приборов в 70–80-х годах прошлого века начался постепенный переход на тиристорно-импульсные и контакторно-транзисторные системы управления коллекторными двигателями постоянного тока, а также транзисторные системы управления асинхронными двигателями, которые позволяют экономить до 30 % энергии, затрачиваемой на тягу, а также рекуперировать ее в аккумуляторы, либо в контактную сеть. Поскольку общее электропотребление только трамвайным и троллейбусным транспортом России по данным на 2016 г. составило 2,1 млрд кВт·ч [3], экономия в масштабах страны принесет существенный экономический эффект.

Предприятия электрического транспорта понимают важность энергосбережения, поскольку это вопрос затрагивает, в том числе, и их рентабельность. Поэтому устаревшие модели электрического транспорта подвергаются либо замене, либо модернизации. Так, в Москве (Трамвайно-ремонтный завод), Санкт-Петербурге (Октябрьский электровагоноремонтный завод), Челябинске (ЧелябТрансСервис), Краснодаре (Тихорецкий машиностроительный завод) и многих других городах налажен технологический процесс обновления и замены оборудования на отечественных трамваях

производства Усть-Катавского и Петербургского трамвайно-механического заводов, а также чехословацких вагонов Tatra. Помимо замены тяговых агрегатов модернизации подвергаются системы освещения и обогрева, что не только снижает потребление энергии, но и делает пользование таким транспортным средством более комфортным для пассажиров.

Новый подвижной состав обладает большей инвестиционной привлекательностью за счет комплексного применения новейших энергосберегающих разработок производителями и большего ресурса срока службы. К сожалению, не все предприятия могут себе его позволить, но среди крупнейших закупок последнего времени можно выделить поставки 300 трамваев 71-931М «Витязь-М», порядка 600 вагонов метро 81-765/766/767 «Москва» в Москву и более 100 троллейбусов с увеличенным автономным ходом Тролза-5265.08 «Мегаполис» в Санкт-Петербург. В случае с последними производителю ЗАО «Тролза» удалось снизить затраты на тягу до уровня менее 0,8 кВт·ч/км, что позволяет троллейбусу проехать около 60 км без подзарядки.

Часть затрат предприятий на тягу зависит также от уровня потерь в системе тягового электроснабжения: от подстанций до контактных проводов и контактных рельсов. Эта проблема особенно остро стоит в тех городах, где электрический транспорт появился в довоенное время, и имеет разветвленную сеть – Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург, Москва и другие. Тяговые подстанции в них многочисленны, а оборудование большинства из них в значительной степени является устаревшим, так как более эффективная полупроводниковая техника получила развитие позже времени их постройки. Таким образом, задача замены оснащения подстанций и энергетической инфраструктуры становится все более актуальной.

Также немаловажны и остальные затраты электроэнергии, которые составляют порядка 10 % от общих значений. Это производственные потребности – освещение цехов и помещений, питание станков и прочих устройств, используемых в процессе обслуживания и ремонта электроподвижного состава. В случае с метрополитеном к этим пунктам добавляются также затраты на освещение станций, обеспечение работы эскалаторов. Например, на предприятии ГУП «Горэлектротранс» в Санкт-Петербурге действует лимит потребления на год со снижением на 3 % всем подразделениям, по плану экономический эффект внедряемой программы по энергосбережению за год должен составить более 20 млн рублей. Также в казанском метрополитене применены эскалаторы с датчиками нахождения людей на ступенях, что в период отсутствия пассажиров позволяет останавливать приводной механизм, тем самым осуществлять экономию энергии.

Вышесказанное позволяет заключить, что действия, предпринимаемые операторами городского электрического транспорта в российских городах, направленные на сбережение ресурсов и финансов, способны помочь им добиться значительных успехов в деле повышения собственной энергоэффективности. При этом существует ограничение в виде нехватки источников инвестирования в данный процесс, которое его замедляет. Вложения, сделанные в обновление подвижного состава и транспортной инфраструктуры, отразятся на уровне эксплуатационных затрат, что в конечном итоге позволит направить высвободившиеся средства на дальнейшее развитие систем электрического транспорта.

### Список литературы

1. Абдуллин Д.Р., Грищук Д.В. Разработка программно-аппаратного комплекса «Тренажер для обучения водителей рельсового наземного городского электрического транспорта энергоэффективным режимам движения» // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. / под ред. Е.Г. Гуровой. Новосибирск, 2016. Т. 5. С. 159–161.
2. Современное состояние и актуальные проблемы городского электрического транспорта / Л. Н. Киснеева [и др.] // Современные научные исследования и разработки. 2017. № 9 (17). С. 216–219.
3. Росстат. Российский статистический ежегодник. М.: Статистика России, 2016. 725 с.

УДК 620.19

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Мусса Гумерович Баширов<sup>1</sup>, Ильвина Гамировна Хуснутдинова<sup>2</sup>,  
Рустам Дамирович Биткулов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате  
<sup>1</sup>eapp@yandex.ru, <sup>2</sup>ilvina011@mail.ru, <sup>3</sup>rou.strat@mail.ru

Для количественной оценки напряженно-деформированного состояния и ресурса безопасной эксплуатации металла электрооборудования по значениям параметров сигнала электромагнитно-акустического преобразователя разработан алгоритм обработки сигнала и предложен информативный параметр.

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический эффект, передаточная функция, метод моментов, напряженно-деформированное состояние.

# THE APPLICATION OF THE METHOD OF DYNAMIC IDENTIFICATION TO ASSESS TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT METAL

M.G. Bashirov, I.G. Khusnutdinova, R.D. Bitkulov

To quantify the stress-strain state and the resource of safe operation of the metal electrical equipment by the values of the signal parameters of the electromagnetic-acoustic transducer, an algorithm for signal processing is developed and an informative parameter are formulated.

**Key words:** electromagnetic-acoustic effect, transfer function, method of moments, stress-strain state.

В процессе эксплуатации металлические элементы электроэнергетического оборудования испытывают различного рода перегрузки: температурные, от внутреннего давления, собственного веса. Также они испытывают ветровые нагрузки и нагрузки, характерные для зимнего периода: налипание и обледенение снега, что, в конечном счете, может привести к аварийным ситуациям, характеризующиеся, прежде всего, значительным экономическим ущербом, а также экологическим ущербом.

Одним из наиболее перспективных методов оценки напряженно-деформированного состояния металлических конструкций электрооборудования является электромагнитно-акустический (ЭМА) метод, который также позволяет оценивать ресурс безопасной эксплуатации электрооборудования. Информативные параметры электромагнитно-акустического эффекта отражают изменение свойств металла электрооборудования в процессе эксплуатации.

В данной работе приведены результаты исследований с применением электромагнитно-акустического эффекта [1–3].

Целью исследования было нахождение зависимости между расположением корней полинома знаменателя передаточной функции (ПФ) и механической нагрузкой, приложенной к образцам металла.

Объектом для исследования были выбраны и подготовлены согласно ГОСТ 380-2005, ГОСТ 535-2005 образцы из стали марки Ст3сп, размеры которых представлены на рис. 1.

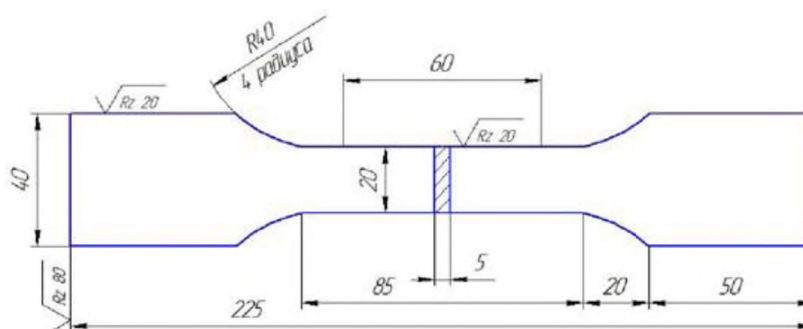
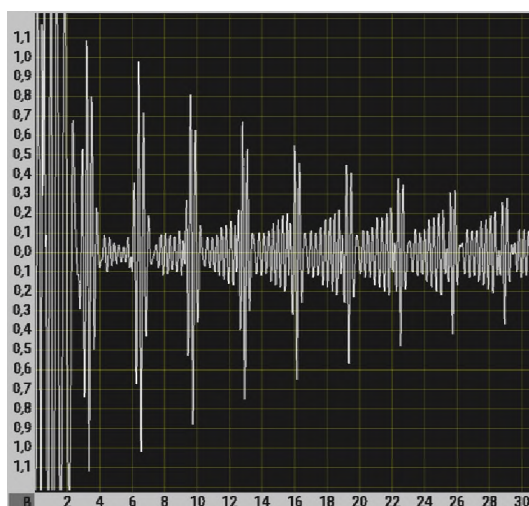


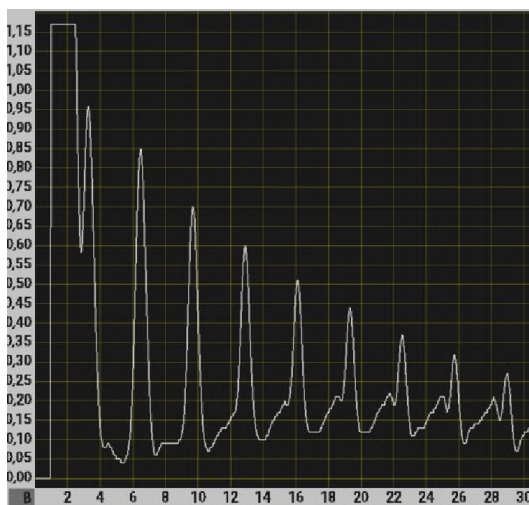
Рис. 1. Образец из стали Ст3

В качестве ЭМА преобразователя использовался преобразователь ЭМА толщиномера EM2210 компании ООО «НПО «Октанта». Для работы с данным прибором предусмотрено программное обеспечение компании ООО «НПО «Октанта», которое отображает данные с толщиномера. На рис. 2 представлены графики сигналов, которые в дальнейшем были использованы для исследования. Использовалась зависимость уровня электрического напряжения (мВ) сигнала от времени (мкс). На рис. 2, *а* представлена сама зависимость, а на рис. 2, *б* эта же зависимость после пропускания его через фильтр, именно ее мы использовали в качестве исследуемой в работе.

Исследуемый объект контроля представляется в виде «черного ящика», на вход которого подается сигнал, излучаемый толщиномером, а в качестве выходного сигнала используется донный сигнал, являющийся отражением от противоположной поверхности объекта. На рис. 2 изображен входной сигнал – зондирующий импульс, и выходной сигнал – донный сигнал, расположенный в промежутке между 4 и 8 мкс.



*а*



*б*

Рис. 2. Сигнал толщиномера EM2210 до обработки (*а*) и после фильтрации (*б*)



Идентификация передаточной функции объекта выполняется с использованием метода моментов [4]. Моменты являются коэффициентами разложения передаточной функции  $W(s)$  в ряд Тейлора в точке  $s = 0$ . Данный метод реализовывался в пакете Maple. Программа в среде Maple позволяет по кривой изменения во времени сигнала прибора ЕМ2210 найти передаточную функцию (математическую динамическую модель) объекта [4]. Программа позволяет вычислить коэффициенты и корни характеристического уравнения, которые отображают техническое состояние объекта контроля. При расчетах были использованы характеристические полиномы второго порядка.

На рис. 3–5 представлены расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для трех точек на образце, в которых было проведено измерение. График построен для верхней полуплоскости, так как расположение комплексно-сопряженного корня симметрично относительно оси абсцисс.

При нахождении зависимостей между значениями корней характеристического уравнения и нагрузками, прикладываемыми к образцу, для удобства была проведена группировка данных: в группу значений, образующих одну линию, вносятся значения, которые изменяются по убыванию. При невыполнении данного условия, начиная со значения, которое не соответствует условию выше, создается новая группа значений.

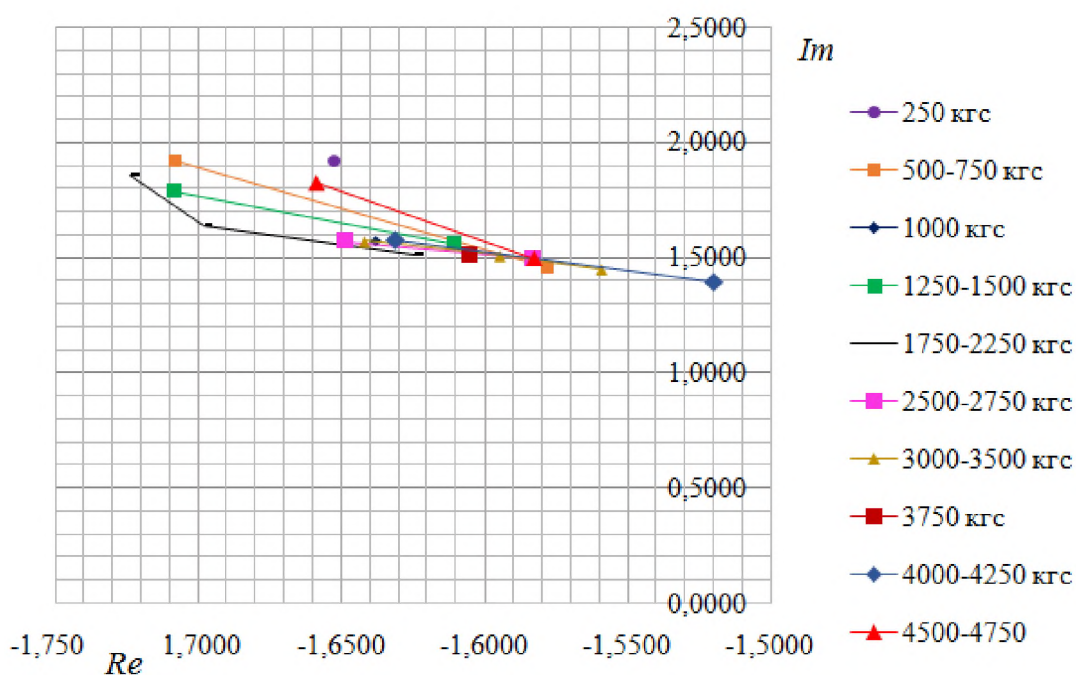


Рис. 3. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для точки № 1 при растяжении образца

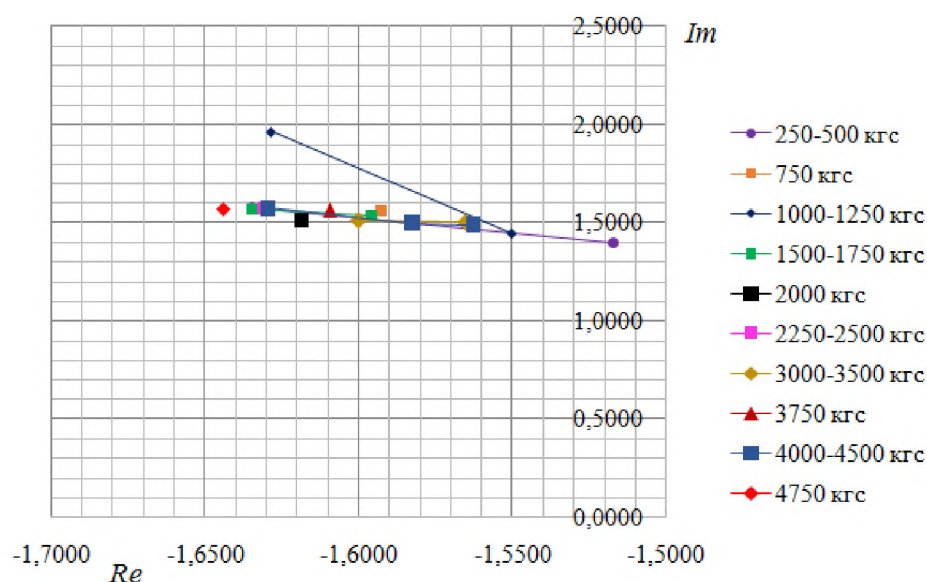


Рис. 4. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для точки № 2 при растяжении образца

Из рисунков видно, что полученные значения имеют циклический характер изменения. В работе [5] авторами получен стадийный характер изменения микродеформаций кристаллической решетки металла.

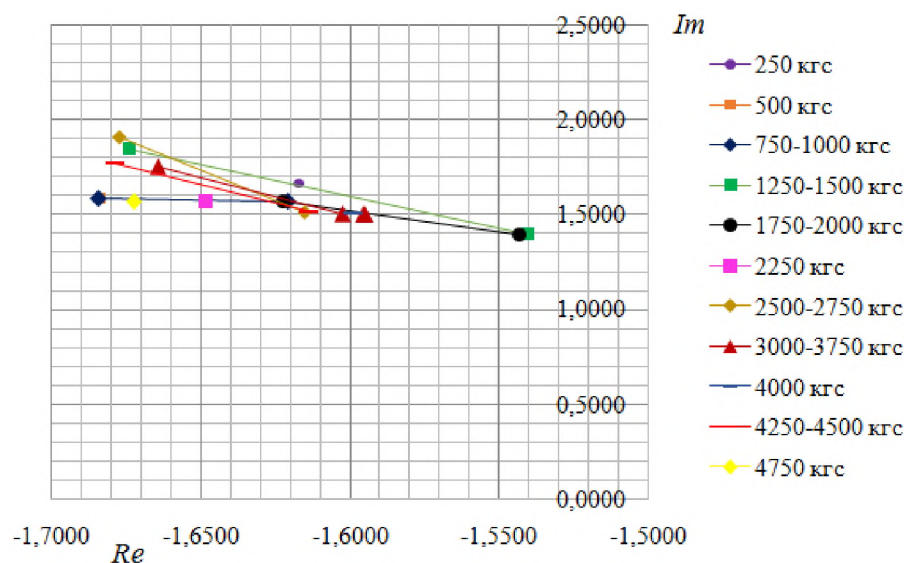


Рис. 5. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для точки № 3 при растяжении образца

Действительное значение корня характеристического уравнения перемещается к оси ординат, однако в определенной стадии возникает резкое отдаление от оси ординат корней характеристического уравнения на комплексной плоскости. Это можно объяснить тем, что возникает существенное уменьшение накопленных микродеформаций кристаллической решетки

до уровня, примерно равного приобретенному при более низких значениях нагрузки. Выделяется часть запасенной энергии искажений кристаллов металла, и происходит их перестройка с конфигурацией низкой энергии [5]. Наиболее чувствительные к изменениям напряженно-деформированного состояния и степени поврежденности структуры металла корни характеристического уравнения называются доминирующими корнями.

Данная область исследований является перспективной в связи с тем, что появляется возможность оценки состояния металла на раннем этапе развития дефекта для предотвращения аварий на электроустановках [6]. В дальнейшем планируется создание банка справочных данных для различных марок сталей и их состояний, обучение искусственной нейронной сети оценке остаточного ресурса по значениям интегрального параметра безопасности.

### Список литературы

1. Хуснутдинова И.Г., Биткулов Р.Д., Баширова Э.М. Применение электромагнитно-акустического преобразователя для оценки степени напряженно-деформированного состояния металлических элементов энергетического оборудования // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): матер. V Всерос. науч.-техн. конф. (к 50-летию кафедры «Электроснабжение и электротехника» института энергетики и электротехники). Тольятти, 2017. С. 466–471.
2. Хуснутдинова И.Г., Биткулов Р.Д., Баширова Э.М. Конструктивные элементы устройства для оценки технического состояния металлических конструкций // Межрег. науч. конф. XI ежегод. науч. сессии аспирантов и молодых ученых: сб. матер.: в 3 т. Вологодский государственный университет, 2017. С. 267–270.
3. Анализ основных параметров электромагнитно-акустических преобразователей / М.Г. Баширов [и др.] // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2018: матер. Междунар. науч.-метод. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. С. 235–238.
4. Аязян Г.К., Хоробров В.Р., Галиев Р.М. Метод идентификации динамических характеристик объектов с запаздыванием // Автоматизация и метрологическое обеспечение измерений в нефтяной промышленности: сб. матер. Уфа, 1980. С. 29–32.

5. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем. Диагностика и прогнозирование долговечности. Гилем, 1997. 177 с.

6. Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г. Разработка электромагнитно-акустического метода диагностики электроэнергетического оборудования // Наука. Технология. Производство – 2014: сб. матер. Уфа, 2014. С. 68–70.

УДК 620.9

## УЛУЧШЕНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Азат Салаватович Хисматуллин<sup>1</sup>, Азат Салаватович Деревянко<sup>2</sup>,  
Евгений Юрьевич Мавлекаев<sup>3</sup>, Евгения Геннадьевна Солдатова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате

<sup>2</sup> «ООО Газпром нефтехим Салават»

<sup>1</sup>hism5az@mail.ru, <sup>2</sup>74dna@snos.ru, <sup>3</sup>giltanasheal@mail.ru, <sup>4</sup>gadag76@gmail.com

В статье приведен один из способов по модернизации и ресурсосбережению силового масляного трансформатора. Он заключается в улучшении системы охлаждения путем барботирования пузырьками элегаза охлаждающего агента – трансформаторного масла.

**Ключевые слова:** техническое состояние трансформатора, электроснабжение, контроль, ремонт, элегаз, эффективность, барботирование.

## IMPROVE COOLING SYSTEM OIL TRANSFORMERS

A.S. Khismatullin, N.A. Derevyanko, E.Y. Mavlekaev, E.G. Soldatova

This article provides one of the ways to modernize and save power oil transformer. It consists in improving the cooling system by bubbling bubbling SF<sub>6</sub> gas of a cooling agent – transformer oil

**Keywords:** technical position transformer, electric power supply, supervision, recondition, sulfur hexafluoride, efficiency, agitation.

Трансформатор – один из основных аппаратов системы электро-снабжения. Благодаря развитию научно-технического прогресса, промышленному освоению новых электротехнических материалов, применению инновационных систем охлаждения, совершенствованию технологии трансформаторостроения заметно улучшаются энергетические показатели трансформаторов [1–5]. Однако процедура модернизации трансформаторов в промышленных масштабах является дорогим мероприятием. В связи с этим возможным способом увеличения мощности работающего оборудования является организация более интенсивного отвода тепла.

Анализируя причины выхода из работы силового масляного трансформатора, построена диаграмма причин отказов. На рис. 1 видно, что проблемы с маслом – основная причина отказов силовых трансформаторов (более 50 % всех отказов) [4].

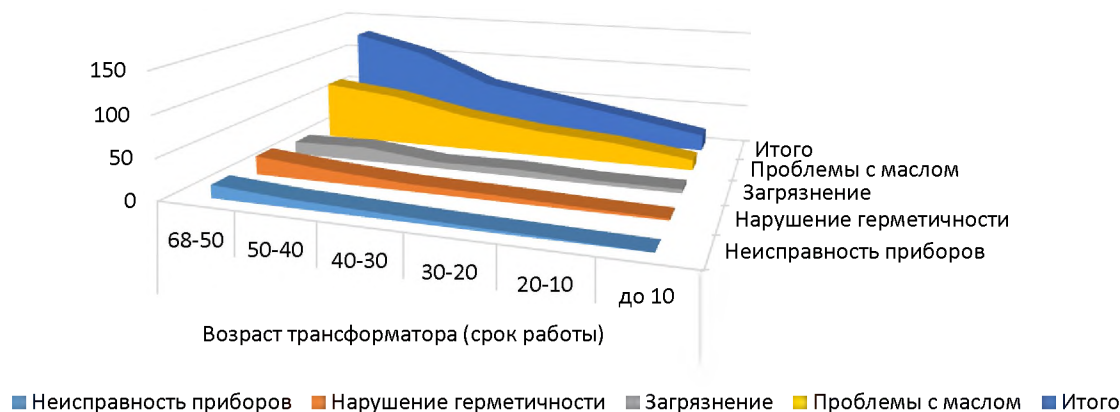


Рис. 1. Причины отказов масляных трансформаторов

Перегрузка и ненормальный режим работы трансформатора приводит к нагреву его обмоток. А это, в свою очередь, негативно сказывается на изоляции и свойствах масла. Для предотвращения этого предложена концепция «Установка для охлаждения масляного трансформатора» [3]. Суть данной модели заключается в контроле температуры активной части силового масляного трансформатора. Охлаждение происходит циркулирующим в трансформаторном масле элегазом. Принцип лежит в барботировании пузырьками газа, которые захватывают капли масла и уносят в бак-расширитель. Сам элегаз охлаждается в специальном холодильнике и поступает в специальный сборник, из которого подается компрессором в емкость с маслом. Благодаря установленному датчику температуры в области обмотки трансформатора происходит автоматическое управление компрессором, что выводит технику на уровень автоматического безопасного использования. Логика автоматики проста: при нагревании обмоток сверх установленного порога температуры узел управления передает сигналы включения на вход компрессора и холодильника, далее температура снижается благодаря циркулирующим пузырькам, и при достижении оптимального значения узел управления подает сигнал на отключение. Еще одна особенность, которая делает установку экономичной, заключается в ждущем режиме системы: если трансформатор работает в нормальном режиме без перегруза, то в затрачивании энергии на барботаж нет необходимости. Задача установки обеспечить рациональное и оперативное

охлаждение. То есть необходимо четко установить интервал температур и сохранять его с целью оптимального расхода элегаза. Расход элегаза, проходящего через емкость трансформатора за единицу времени, отвечает за интенсивность остывания масла.

На рис. 2 представлена структурная схема установки для охлаждения масляного трансформатора.

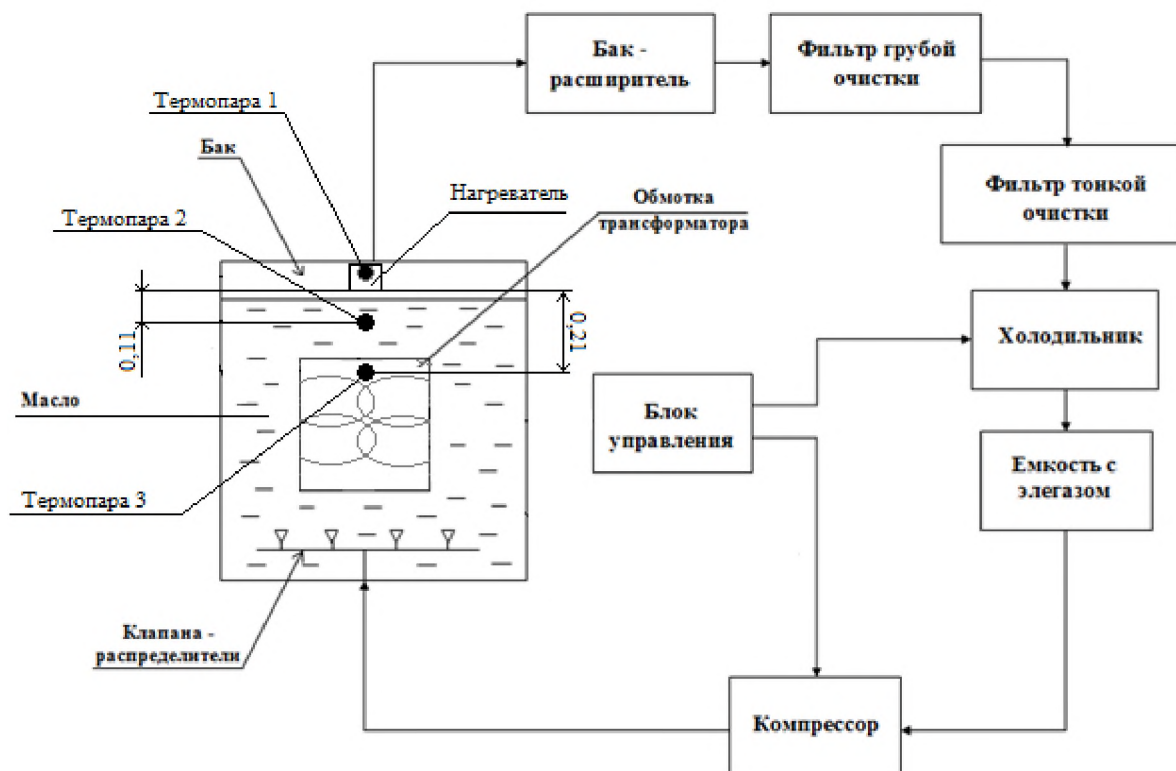


Рис. 2. Концепция улучшенной системы охлаждения масляного трансформатора

Предоставленный метод охлаждения силовых масляных трансформаторов является передовым, более эффективным решением для применения на предприятиях и считается новейшим течением развития трансформаторостроения. Установка эффективна особенно в жаркий период времени, когда масляная система охлаждения не справляется с отводом тепла. Благодаря автоматическому мониторингу и непосредственному контролю, уменьшается угроза взрыва трансформатора, что обеспечивает надежность и здоровье потребителей и рабочих.

### Список литературы

1. Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А. Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 4-2. С. 271–274.



2. Установка для охлаждения масляного трансформатора: п. м. 167206 Рос. Федерация № 2016124531; заявл. 20.06.16; опубл. 27.12.16, Бюл. № 36.

3. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // Thermophysics and aeromechanics. 2012. Vol. 19. № 4. P. 589–606.

4. Продление ресурса масляных трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / О.О. Кривоконева [и др.] // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т. 17. № 3. С. 60–66. (Сер. «Энергетика»).

5. Применение автоматического режима контроля электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов / М.Г. Баширов [и др.] // Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 6. С. 28–35.

УДК 620.19

## **ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ РИСКА АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА**

Мусса Гумерович Баширов<sup>1</sup>, Ильвина Гамировна Хуснутдинова<sup>2</sup>,  
<sup>3</sup>Антон Игоревич Переверзев

<sup>1,2,3</sup>Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате

<sup>1</sup>eapp@yandex.ru, <sup>2</sup>ilvina011@mail.ru, <sup>3</sup>ant5911@yandex.ru

В статье представлен количественный метод оценки снижения риска аварий на объектах нефтегазового комплекса при использовании электромагнитно-акустического метода. Выполнен расчет потенциального риска и сравнение результатов двух вариантов.

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический метод, объекты нефтегазового комплекса, количественная оценка риска, потенциальный риск, дерево отказов, имитационное моделирование, технологические трубопроводы.

## **ASSESSMENT REDUCE THE RISK OF ACCIDENTS AT OIL AND GAS FACILITIES WHEN USING THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD**

M.G. Bashirov, I.G. Khusnutdinova, A.I. Pereverzev

The article presents a quantitative method for assessing the risk of accidents at oil and gas facilities when using the electromagnetic-acoustic method. The calculation of the potential risk and the comparison of the results of the two options.

**Keywords:** electromagnetic-acoustic method, oil and gas entities, quantitative risk assessment, potential risk, fault tree, simulation modeling, technological pipelines.

По оценке аналитиков и экспертов действующие трубопроводы мира превысили показатель срока службы почти в два раза и находятся в критическом состоянии. Поэтому продление срока эксплуатации, а также постоянный мониторинг трубопроводов становится актуальной задачей [1]. Самыми распространенными проблемами для трубопроводов являются трещины, коррозии и расслоения. В связи с этим возникает необходимость использования современных методов диагностирования для обеспечения безопасности обслуживающего персонала.

Безопасность промышленных объектов тесно связано с технической диагностикой и неразрушающим контролем. Количественная оценка потенциальной опасности промышленных объектов при анализе риска аварий является основной частью управления промышленной безопасностью. Для оценки риска аварий используют определенные показатели риска, одним из которых является потенциальный риск. Он показывает потенциал максимально возможной опасности для определенных объектов воздействия [1]. При анализе причин возникновения аварийных ситуаций на технологических трубопроводах рекомендуется рассматривать отказы технических устройств, связанные с физическим износом. На частоту разгерметизации трубопровода влияет периодичность диагностирования технических устройств. Использование методов технического диагностирования способствует снижению риска возникновения аварии. Применение электромагнитно-акустического метода и метода динамической идентификации напряженно-деформированного состояния (НДС) совместно с применением в качестве комплексного параметра передаточной функции системы «объект контроля – электромагнитно-акустический преобразователь» позволяет своевременно выявить, заменить дефектные узлы и элементы, а также получить информацию о фактическом состоянии контролируемого объекта [2]. Применение электромагнитно-акустического метода для оценки НДС и дефектов на «раннем» этапе развития согласно расчетам позволяет снизить частоту разгерметизации трубопровода в два раза.

Расчет показателей рисков производился в программе «PromRisk – расчет риска на производственных объектах» [3]. При планировании и организации анализа риска аварий рекомендуется определить анализируемый объект и дать его общее описание. Параметры транспортируемой среды представлены в табл. 1. Модель производственного объекта для расчета показана на рис. 1.



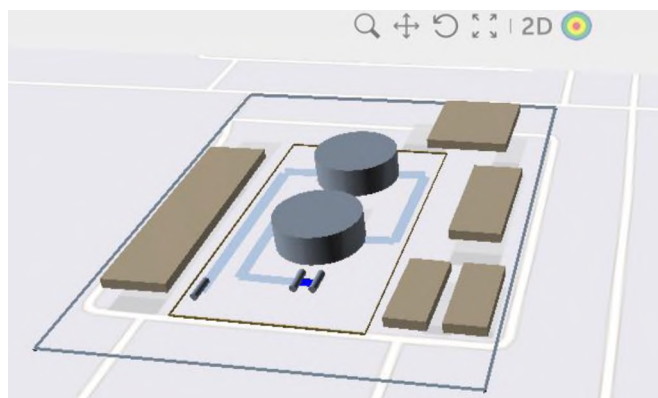


Рис. 1. Модель производственного объекта

Таблица 1

Параметры транспортируемой среды

| Название параметра                                                 | Значение |
|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Тип                                                                | Жидкость |
| Низшая теплота сгорания, МДж/кг                                    | 43,64    |
| Молярная масса, кг/моль                                            | 98,2     |
| Плотность кг/м <sup>3</sup>                                        | 745,0    |
| Температура вспышки, °С                                            | –36      |
| Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)    | 1,06     |
| Константа Антуана, <i>A</i>                                        | 4,12311  |
| Константа Антуана, <i>B</i>                                        | 664,9    |
| Константа Антуана, <i>C</i>                                        | 221,7    |
| Массовая скорость выгорания, кг/м <sup>2</sup> ·с                  | 0,059    |
| Удельная площадь разлива в помещении, м <sup>2</sup> /л            | 1,0      |
| Удельная площадь разлива для наружной установки, м <sup>2</sup> /л | 0,15     |
| Класс чувствительности                                             | 3,0      |
| Корректировочный параметр                                          | 1,0      |

В качестве инициирующих пожароопасные ситуации и пожары на объекте рассматриваются при разгерметизации трубопровода. Реализация инициирующих пожароопасные ситуации событий, связанных с разгерметизацией трубопроводов, приводит к образованию пролива в пределах обвалования, а в случае полного разрушения также и к проливу вне обвалования [3].

При оценке риска аварии расчет проводился для двух случаев:

- применение традиционных методов ультразвукового контроля (вариант 1);
- применение совершенствованного метода – контроль на раннем этапе развития дефекта – оценка степени поврежденности (вариант 2).

В качестве оценок вероятностей «исходных» событий использовались значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Определение частоты инициирующих событий  
(разгерметизация технологического трубопровода)

| Наименование показателя                  | Вариант 1             | Вариант 2             |
|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Частота возникновения, год <sup>-1</sup> | $3,316 \cdot 10^{-6}$ | $1,658 \cdot 10^{-6}$ |
| Диаметр отверстия истечения, мм          | 50                    | 50                    |

В табл. 2 частота разгерметизации выведена уже с учетом длины трубопровода. На рис. 2 приведена диаграмма сценария развития аварийной ситуации при разгерметизации трубопровода с диаметром отверстия истечения 50 мм для случая применения совершенствованного метода – контроль на раннем этапе развития дефекта – оценка степени поврежденности [4].

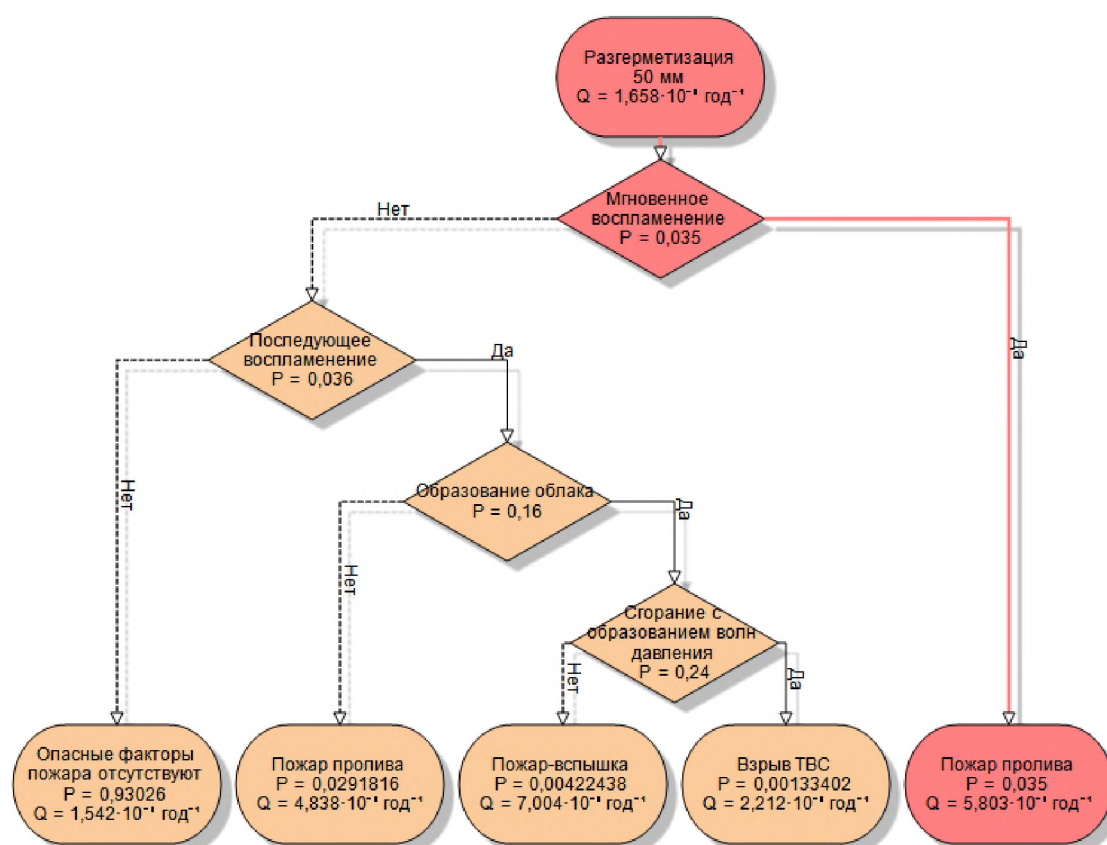


Рис. 2. Диаграмма сценария развития аварийной ситуации при применении совершенствованного метода контроля технологического трубопровода

Результаты количественной оценки массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций, показаны в табл. 3.

Таблица 3

Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций

| Наименование показателя                         | Значение                 |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| Объемный расход истечения жидкости              | 0,0102 м <sup>3</sup> /с |
| Массовый расход истечения жидкости              | 7,59 кг/с                |
| Объем вылившейся жидкости                       | 3,11 м <sup>3</sup>      |
| Площадь пролива                                 | 62,2 м <sup>2</sup>      |
| Масса вылившейся жидкости                       | 2318,1 кг                |
| Давление насыщенных паров при температуре 39 °С | 37,35 кПа                |
| Масса образовавшихся паров                      | 82,93 кг                 |

По итогам расчета для каждого сценария развития аварии и для промышленного объекта в целом строятся поля потенциального риска, что позволяет оценить вклад отдельного сценария в итоговую величину риска [5]. На рис. 3 приведены поля потенциального пожарного риска, обусловленного возникновением пожароопасных ситуаций в оборудовании объекта для двух случаев.

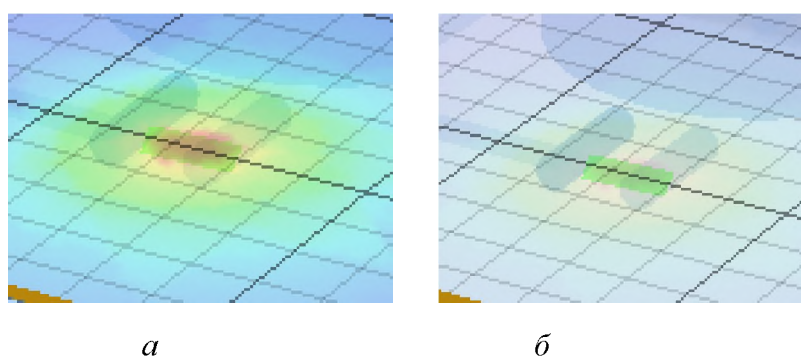


Рис. 3. Построение полей птенциального пожарного риска: *а* – применение традиционных методов ультразвукового контроля; *б* – применение совершенствованного метода – контроль на раннем этапе развития дефекта – оценка степени поврежденности

В табл. 4, 5 приведены результаты расчетов для двух рассматриваемых случаев. Результаты значений потенциального пожарного риска показаны в табл. 5.

Таблица 4

Перечень пожароопасных ситуаций и сценариев их развития

| Наименование пожароопасной ситуации | Сценарий развития пожароопасной ситуации | Частота возникновения, год <sup>-1</sup> , (вариант 1) | Частота возникновения, год <sup>-1</sup> , (вариант 2) |
|-------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Разгерметизация 50 мм               | Пожар пролива                            | $1,151 \cdot 10^{-7}$                                  | $5,803 \cdot 10^{-8}$                                  |
|                                     | Взрыв ТВС                                | $3,224 \cdot 10^{-9}$                                  | $2,212 \cdot 10^{-9}$                                  |
|                                     | Пожар-вспышка                            | $1,401 \cdot 10^{-8}$                                  | $7,004 \cdot 10^{-9}$                                  |
|                                     | Пожар пролива                            | $5,677 \cdot 10^{-8}$                                  | $4,838 \cdot 10^{-8}$                                  |

Оценка потенциального пожарного риска

| Сравниваемые варианты | Значение потенциального пожарного риска |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| Вариант 1             | $1,89 \cdot 10^{-7}$                    |
| Вариант 2             | $1,16 \cdot 10^{-7}$                    |

Значение потенциального пожарного риска уменьшается на 38,6 %.

### Список литературы

1. Галеев А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах: учебное пособие / под ред. А. Д. Галеев, С. И. Поникаров. Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. 152 с.
2. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200133801>.
3. PromRisk – расчет риска на производственных объектах. Руководство пользователя. URL: [https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk\\_manual.pdf](https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk_manual.pdf).
4. Оценка степени поврежденности оболочковых конструкций с использованием электромагнитно-акустического метода контроля / И.Г. Хуснутдинова [и др.] // Фундаментальные исследования. 2015. № 10. Ч. 3. С. 538–541.
5. Баширов М.Г., Миронова И.С. Разработка интегральных критериев для оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового производства // Proceedings. Научные труды. 2015. № 1. С. 46–55. URL: <http://proceedings.socar.az/uploads/pdf/14/Bashir-46-55.pdf>.

УДК 620.97

### УСТАНОВКА FACTS В ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЦЕНТРА

Кирилл Владимирович Логинов<sup>1</sup>, Алексей Валентинович Ударатин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ВоГУ», г. Вологда

<sup>1</sup>luginovk@mail.ru, <sup>2</sup>alexu79@mail.ru

В данной статье рассматриваются устройства FACTS. Дана характеристика Объединенной энергетической системы (ОЭС) Центра: суммарное количество электростанций, общая протяженность линии и установленная мощность. Рассмотрено три вида установки компенсации с помощью FACTS и их особенности. Произведен выбор программы, в которой будет производиться моделирование, и приведен ГОСТ, который послужит основой для решения установки устройств на линию.

**Ключевые слова:** FACTS, СТАТКОМ, поперечная компенсация, продольная компенсация, универсальная компенсация, MATLAB Simulink.

## FACTS INSTALLATION IN THE UNITED ENERGY SYSTEM OF THE CENTER

K.V. Loginov, A.V. Udaratin

This article displays the device FACTS. The total capacity of power plants, the total length of lines and installed capacity. Considered three types of installation with the help of FACTS and their features. The selection of programs that will be provided in accordance with GOST.

**Keywords:** FACTS, static reactive power compensator, lateral compensation, longitudinal compensation, universal compensation, MATLAB Simulink.

На сегодняшний день Российская Федерация является одной из наиболее обеспеченных энергоресурсами государств. Чтобы наиболее экономно распределять электроэнергию, в России была создана Единая энергетическая система, в которую входит более 700 электростанций. Сама ЕЭС образует семь энергетических систем: Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада [1].

В состав Объединенной энергетической системы Центра, которая находится на территории Центрального и Северо-Западного Федерального округа входит около 18 региональных энергетических систем. Электроэнергетический комплекс образуют 143 электростанции мощностью 5 МВт и выше, 2 248 электрических подстанции 110–750 кВ и 2 716 линий электропередачи 110–750 кВ общей протяженностью 88423 км (по данным на 1 января 2018 г.). Суммарная установленная мощность электростанций ОЭС Центра составляет 53077,08 МВт (по данным на 1 января 2018 г.) [2]. Однако передача мощности на большие расстояния не обходится без разных проблем. Так как ОЭС Центра является самой многочисленной по количеству регионов из всех питающих систем, то она требует больших покрытий для питания разных населенных пунктов на большие расстояния. Однако из-за того, что на ней установлено устаревшее оборудование, а в России подключается все больше и больше населенных пунктов, на линии все чаще и чаще увеличиваются потери реактивной мощности. Также на линиях характерно возникновение недостаточной пропускной способности, которая не дает в полной мере удовлетворить желания потребителей.

Все эти проблемы можно решить с помощью установки современных приспособлений для компенсации реактивной мощности. Одними из таких устройств являются гибкие системы передачи переменного тока или FACTS, комплекс электротехнических устройств, зарекомендовавших себя

в развитых странах. Они помогают уменьшить потери на линиях, обеспечить стабильную работу энергосистемы, стабилизировать напряжение в сети, уменьшить затраты на содержание устройств компенсации. Компенсация с помощью FACTS осуществляется несколькими способами: продольной, поперечной или универсальной.

Продольная компенсация реактивной мощности осуществляется обычно с помощью статического синхронного продольного компенсатора (ССПК). Он относится ко второму поколению FACTS и позволяет убрать недостатки конденсаторной батареи с тиристорным управлением. ССПК является статическим синхронным генератором, который работает без внешнего источника энергии как компенсатор, напряжение которого находится в квадрате относительно линейного. Статический синхронный компенсатор позволяет использовать номинальную энергию устройства или поглощать мощность для улучшения динамической составляющей энергосистемы путем дополнительной временной компенсации мощности, чтобы увеличить или уменьшить падение напряжения на линии.

Поперечная компенсация мощности в основном происходит благодаря устройству СТАТКОМ. Так как он относится к типу серийных компенсаторов, это устройство может предоставить мгновенную реактивную мощность в ответ на колебание напряжения в сети, позволяя увеличить стабильность напряжения. Благодаря высокой скорости реакции на колебания, СТАТКОМ можно также использовать как активный гармонический фильтр. Он состоит из преобразователей, соединенных с одной стороны к питанию устройства, а с другой стороны к питающей системе.

Присутствует и третий тип компенсации – универсальный или унифицированная система управления энергопотоками (УСУЭ). Он представляет из себя комбинацию СТАТКОМ и ССПК, которые соединены между собой связью постоянного тока. Это позволяет перетекать мощности из выхода одного устройства в выход другого. Каждая из его частей состоит из трансформатора и электрического преобразователя, которые имеют совместный конденсатор постоянного тока. УСУЭ способно с помощью углового неограниченно последовательного введения напряжения контролировать одновременно или выборочно напряжение, угол линии передачи, сопротивление или активную и реактивную мощность. Универсальная компенсация также позволяет производить независимую шунтирующую компенсацию.

Сравнения между устройствами FACTS представлено в табл. 1.

Сравнение устройств FACTS

| Устройство FACTS | Нагрузка | Контроль напряжения | Переходная стабильность | Динамическая стабильность | Время (сек) |
|------------------|----------|---------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|
| УСУЭ             | Высокая  | Высокий             | Средняя                 | Средняя                   | 0.6         |
| СТАТКОМ          | Низкая   | Высокий             | Низкая                  | Средняя                   | 7           |
| ССПК             | Низкая   | Высокий             | Средняя                 | Средняя                   | 11          |

Для того, чтобы узнать, какую компенсацию необходимо установить на ОЭС, необходимо смоделировать ее и рассчитать. Однако моделирование электросистемы почти всегда отличается от реальности.

Причиной отклонений результатов расчетов от действительности служат погрешности, вносимые со стороны:

- регистраторов качества электроэнергии;
- измерительных комплексов (счетчики электроэнергии, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения);
- программных комплексов по моделированию электрических сетей [3].

Для объективной и точной оценки положительных или отрицательных качеств воздействия FACTS на электросеть необходимо придерживаться ГОСТ 32144–2013. Он нормирует значения частоты, напряжения, фликера, несимметрии, несинусоидальности для российской системы электроснабжения.

Само моделирование необходимо проводить с помощью специально созданных программ. Работу системы можно продемонстрировать с помощью зарекомендовавшей себя MATLAB Simulink. Это мощный инструмент для моделирования электросиловых систем генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии (ЭЭ). Для создания модели используется набор готовых элементов энергосети, таких как генераторы, трансформаторы и линии электропередач, для каждого из которых необходимо задать их требуемые характеристики. В её библиотеке также присутствуют модели устройств FACTS [4].

Устройства FACTS представляют долгосрочное решение для улучшения качества электроэнергии. Благодаря своим параметрам, они уже смогли добиться популярности на иностранном рынке, подтверждая их достоинства при компенсации реактивной мощности. Возможность установки гибких устройств российских ОЭС позволит решить нынешние проблемы энергосетей, улучшить их стабильность и устойчивость, позволить потребителю получать надежную электроэнергию.

## Список литературы

1. Характеристика Единой Энергосистемы России [Электронный ресурс] // География: geofigure.ru. URL: <http://www.geoturistik.ru>.
2. Объединенная энергосистема Центра [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы. URL: <http://so-ups.ru>.
3. Балабанов М.С., Хамитов Р.Н. FACTS-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 184 с.
4. Ударатин А.В., Рысин О.Е. Моделирование эффективности работы устройств FACTS в программе MATLAB Simulink // Межрег. науч. конф. XI ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: сб. матер. Вологда, 2017. С. 133–136.

УДК 621.31

## ВЕРОЯТНЫЕ РИСКИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

<sup>1</sup>Елена Костадиновна Николаева, <sup>2</sup>Наталья Анатольевна Юдина

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>Queenhelenn@yandex.ru

Исследованы проблемы основных видов рисков, с которыми возможно столкнется российская экономика в условиях перехода к цифровому формату, вероятные направления деятельности, которые помогут сгладить негативные отклики рисков цифровой экономики. Государству рекомендуется качественно прогнозировать и вовремя реагировать на быстро формирующиеся тенденции социально-этической направленности, связанной с формированием национального глобального цифрового пространства.

**Ключевые слова:** цифровая экономика, риск, оцифровывание, интерфейс, программисты, государство.

## POSSIBLE RISKS OF THE DEVELOPMENT OF THE DIGITAL ECONOMY

E.K. Nikolaeva, N.A. Yudina

The problems of the main types of risks that may be faced by the Russian economy in the transition to the digital format, the likely activities that will help to smooth the negative responses of the risks of the digital economy. State was advised accurately to anticipate and react to rapidly emerging trends in socio-ethical orientation associated with the formation of national and global digital space.

**Keywords:** digital economy, risk, digitization, interface, programmers, state.



Цифровая экономика понимается не только как «оцифровывание» действующих государственных и бизнес процессов, но и как воплощение чего-то абсолютно нового и невозможного в «аналоговом» мире. Цифровая сущность несет в себе не только новые возможности и перспективы развития, но и видимые риски.

Все уже привыкли к элементам цифровой экономики. К примеру множество интерфейсов с государством, банками и телекоммуникационными компаниями в настоящем цифровые, можно обойтись без участия людей. Мы пользуемся переводом денежных средств, совершаем покупки, оплачиваем налоги и коммунальные платежи и многое другое. В бизнесе тоже наблюдается активное использование элементов цифровой экономики, например, с помощью информационных систем можно привлекать и обслуживать клиентов, проводить закупки нужного сырья для производства и т. д. Все это воспринимается как данность, которая несет с собой помимо развития также и проблемы, которые логичнее назвать рисками. Обозначим основные риски.

Базовый риск связан с отсутствием кадров. Перейти в хозяйствовании к цифровым методам оказалось весьма выигрышно, обслуживать своих клиентов компаниям стало менее затратно, чем в офисах. Существенная экономия составляет на аренде помещения и содержании операторов. Но возникла проблема в кадрах, такого количества грамотных программистов, которые в силах разработать нужную обслуживающую систему, не оказалось на рынке труда. Наши таланты переманивают китайские и американские компании, пообещав им светлое будущее и огромные заработные платы. Из российских компаний не отстают в вербовке специалистов «Мейл.ру» и «Яндекс» [1]. Конечно же возник дисбаланс спроса и предложения на рынке. К чему в итоге привело удовлетворение спроса? Оно привело к подготовке неквалифицированных веб-программистов, так как невозможно за короткий срок, составляющий около месяца, все освоить. Команды из таких веб-разработчиков чаще всего побеждают в конкурсах или тендерах «кто меньше запросит за конкретный функционал». Такие специалисты стоят недорого, на таких быстрых курсах речь о безопасной разработке и безопасной архитектуре не идет. Что мы получаем на выходе? Веб-приложения становятся более ненадежными, потому что весь фокус разработчиков направлен на функционал, хотя главной остается безопасность. Тоже можно сопоставить с сотрудниками информационной безопасности, которым поручили настроить средства защиты, или к инженерам, настраивающим инфраструктуру для приложений.

Быстрый рост приложений цифровой экономики требует и рост тестеров, инженеров, разработчиков и разработчиков «безопасников». Для подготовки отличных специалистов потребуются годы. Нужно составить достойную конкуренцию американским и китайским разработчикам по заработной плате и интересным задачам. Если выпускать слабых специалистов, можно получить уязвимость и массу происшествий.

Бизнес не стоит на месте и требует постоянных изменений, сегодня он реализуется в приложениях. Соответственно приложения тоже должны меняться, быть более гибкими. Нужно менять подход к цифровому бизнесу, начиная со специалистов и заканчивая каждым участником процесса.

Некоторое время назад был объявлен «переход на agile», но так как людям тяжело переходить от старых привычек к новым, ожидаемых результатов пока нет.

Agile – это различные новейшие подходы и методики управления, к которым относят:

- фокусирование команды на целях и нуждах клиентов;
- значительное упрощение организационной структуры и процесса;
- активное использование обратной связи;
- работа короткими циклами;
- повышение полномочий сотрудников;
- гуманистический подход;
- являются образом мышления и образом жизни.

Поэтому, не имея армии грамотных «оцифровщиков» в области бизнеса и области информационных технологий, не совсем понятно как же «оцифровать» экономику [2].

Следующей проблемой «оцифровки» экономики, которая не так очевидна, является смена мест бизнеса и бизнеса информационных технологий. В традиционном бизнесе информационные технологии представляют собой его отражение с целью аналитики или учета. Сначала в бумажно-наличном мире происходят транзакции и договора, а затем все это заносится в информационные технологии системы с целью дальнейшего анализа и учета. Предположим, что с информационной технологией системы что-то пошло не так, и данные исчезли. В таком случае бизнес не пострадает, придется лишь потратить уйму времени для восстановления данных, т. е. «восстановить из первички».

В цифровой экономике нет такого понятия, как «первичка». Информационные технологии не отражают бизнес, они сами являются им. Все совершаемые сделки проходят в бизнес-приложениях и цифровом пространстве. Если раньше информационная технология выходила из строя, то платежные поручения выписывались вручную, работа продолжалась. Сейчас же, если информационная технология выйдет из строя, это приведет к коллапсу, даже аналоговые процессы перестанут работать, потому что управление ими цифровое. Таким образом, информационная технология – это ядро бизнеса, но ни его служебная функция. Если затормозить процесс внедрения таких знаний, то цифровизация не скоро произойдет. В настоящее время в этом вопросе хорошо разбираются инноваторы и интернет-гиганты, или же банки без офисов [2].

Далее рассмотрим риск «интернета вещей». Интернет вещей крепко закрепился в нашей повседневной жизни. Мы имеем возможность управлять своим автомобилем, бытовыми приборами, стационарным и мобильным (дроны) видеонаблюдением, можем открывать двери через применение мобильного приложения. Такие приложения вносят комфорт и оптимизируют ресурсы. За все это стоит сказать спасибо небольшим модулям-контролерам в наших устройствах. Модули-контролеры собирают и обрабатывают информацию, обмениваются командами с другими приборами и реагируют на команды. Чаще всего эта функция товара служебная, неключевая, и, соответственно, дешевая. Отсюда следует, что производитель сэкономил на безопасности.

Когда владелец устройства по своей цифровой безграмотности оставляет пароли в свободном доступе – это лазейка для злоумышленников. Минимальный ресурс модулей-контролеров не дают возможности вклинить в них «навесную» безопасность, тогда как производители еще не озадачились о «встроенной» безопасности. Были случаи мощнейших DDoS-атак [3], когда видеокамеры объединялись в бот-сеть. Перехват управления и блокировка систем участились в последнее время.

Не менее важный риск искусственного интеллекта. Сегодня большим спросом пользуются такие технологии, как распознавание голосовых команд, сканирование по сетчатке глаза, распознавание лица с городских и домашних камер видеонаблюдения, анализ пользовательских предпочтений и многое другое. Если искусственный интеллект находится в руках злоумышленника, он легко подберет пароль и докажет, что не является роботом.

С внедрением и использованием искусственного интеллекта в цифровой экономике повышаются пути вредоносного использования его уязвимости с целью совершения преступлений. Вполне вероятно противостояние двух искусственных интеллектов в гражданской области или области вооружений. Есть вероятность и обратного развития.

Риск использования блокчейна. По сути, блокчейн является технологией хранения данных и информации об обработке самих данных. Но есть отличие от других систем, она имеет уникальный принцип работы. Призвание технологии в совершении революции в экономике. Если перевести процессы на блокчейн, то польза будет очевидна, как и угрозы. Блокчейн платформа как быстроразвивающееся программное обеспечение обладает неидеальностью и уязвимостью, которые в свою очередь группируются с уязвимостью в других смарт контактах, разработанных специалистами на других блокчейн платформах. Уязвимость в блокчейн платформе может привести ветвлениям («форкам») в экосистеме криптовалют [2]. Основным принципом ветвления – неизменность проведенных транзакций. Например, если транзакция была подтверждена, но при этом была вызвана сбоем, оказалась ошибочной, неправильной или мошеннической, исправлению не подлежит ни в каком случае.

Цифровая экономика – полезная цель и вполне перспективная. Достижения в процессе развития, несомненно, принесут пользу: оптимизируются неэффективные бизнес процессы, высвободятся огромные ресурсы, оптимизируются процессы государственного управления, повысится управляемость и прозрачность государства и бизнеса.

Описанные выше серьезные риски могут подавить достижения в цифровой экономике. При проектировании цифровой системы следует заранее продумать все возможные риски с целью уменьшения их влияния и торможения развития цифровой экономики. При построении архитектуры системы и ее проектировании должна в первую очередь быть учтена ее безопасность. Нужно искоренить принцип, который еще уместен, «вот вам система, которую мы сделали, а ваше дело теперь придумать защиту». Необходимо создавать информационную безопасность ненавесной системой. Нужно сделать ее встроенной функцией для каждой информационной технологии системы. Только в таком случае есть вероятность избежать риски.

## Список литературы

1. Ахромеева Т.С., Малинецкий Г.Г., Посашков С.А. Стратегии и риски цифровой реальности // Культура и безопасность: интернет-журнал о культуре как факторе национальной безопасности. URL: <http://sec.chgik.ru/strategiii-riski-tsifrovoy-realnosti/>
2. Андрияшин Ю.Н. О целях, возможных рисках и последствиях «цифровой экономики» // Русское экономическое общество им. С.Ф. Ша-рапова. URL: <http://reosh.ru/yu-n-andriyashin-o-celyax-vozmozhnykh-riskakh-i-posledstviyakh-cifrovoj-ekonomiki.html>.
3. Российская газета RG.RU. URL: <https://rg.ru/2018/02/28/>

УДК 628.9:6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИНЕГО СВЕТА

Алина Ринатовна Денисова<sup>1</sup>, Диляра Рамилевна Хайруллина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>hajliliya@mail.ru

Целью проведения исследования является определение опасности воздействия синего света на зрение и самочувствие человека.

**Ключевые слова:** синий свет, спектр видимого света, светоизлучающие диоды, воздействие, сетчатка, ультрафиолетовое излучение.

## RESEARCH OF BLUE LIGHT EXPOSURE

A.R. Denisova, D.R. Khairullina

The purpose of the study is to determine the risk of exposure to blue light on human vision and well-being.

**Keywords:** blue light, visible light spectrum, light-emitting diodes, impact, retina, ultraviolet radiation.

Глаза чувствительны к узкой полосе частот, называемой спектром видимого света. Синий свет – наименьшая длина волны (380–500 нм) во всем этом спектре, и, как таковая, она также несет в себе наибольшее количество энергии. Поскольку весь видимый спектр простирается от 380 до 700 нм, синий свет занимает около трети его линий [1]. Его основным источником является солнце, но количество искусственных источников синего света внутри помещений растет. Сюда входит флуоресцентное и светодиодное освещение, экраны дисплеев смартфонов, планшетов, компьютеров, телевизоров с плоским экраном и другое. Хотя свет кажется

белым, светоизлучающие диоды имеют максимум излучения в диапазоне синего света от 400 до 490 нм. В связи с изменением подсветки жилых и административных помещений, а также увеличением использования прямого освещения для чтения, влияние синего света увеличивается [3].

Глаз хорошо блокирует попадание ультрафиолетовых лучей на сетчатку, но плохо противодействует синему свету, проходящему через роговицу и хрусталик. Такой эффект влияния является кумулятивным, и общее количество часов воздействия имеет значение [2]. В отличие от взрослых, кристалльная линза ребенка более прозрачна для коротких волн, подобных синему свету, что, непосредственно, делает детей более чувствительными к данному излучению.

Воздействие синего света также может способствовать:

- катаракте. Хрусталик у людей поглощает ультрафиолет на протяжении всей жизни и с возрастом постепенно угасает (желтеет). К двадцати годам он достаточно пожелтел, чтобы фильтровать только часть видимого синего свечения с высокой энергией. Тем не менее, существует мнение, что это поглощение на протяжении многих лет способствует старению и образованию катаракты, и что защита от двойного воздействия синего света и ультрафиолетового излучения может отсрочить ранние признаки старения, как обоих линз, так и самой сетчатки;

- дегенерации желтого пятна. Чрезмерное воздействие синего света может повредить светочувствительные клетки сетчатки, что, в свою очередь, приведет к изменениям, напоминающим макулярную дегенерацию с риском постоянной потери зрения [2]. Исследования показали, что именно кумулятивный эффект воздействия вызывает это ухудшение, затрагивая в основном колбочки (светочувствительные клетки, отвечающие за центральное зрение и восприятие цвета) и пигментный эпителий сетчатки (клетки, функция которых состоит в том, чтобы подпитывать клетки сетчатки). Лютеин – синий блокирующий пигмент обнаружен в сетчатке здорового человека, и, как известно, он защищает от фотодеградации синим светом [8]. Время суток воздействия также может быть важным фактором, и исследования в этой области продолжаются;

- усталости глаз. Компьютерные экраны и другие цифровые устройства излучают значительное количество синего света, и люди все больше и больше часов смотрят на них. Волны синего света высокой энергии больше рассеиваются в глазу и не так легко сфокусированы. Этот разброс создает «визуальный шум», который снижает контраст и может способствовать увеличению напряжения глаз [4];

- проблемам со сном. Определенные длины волн синего света могут помочь улучшить настроение, бдительность, память и когнитивные функции. Синий свет также важен для регуляции циркадного ритма, естественного цикла сна и бодрствования. Правильное и своевременное воздействие высокоэнергетического синего света помогает организму поддерживать бодрствование, а вечером, когда естественный синий свет (солнце) уменьшается, начинается цикл отдыха. Поэтому воздействие слишком большого количества синего света ночью через экраны и внутреннее освещение может привести к ухудшению качества сна, затруднению засыпания и дневной усталости [3, 6].

По большей части подростки предпочитают циклы сна и бодрствования, которые значительно не совпадают с циклами детей младшего возраста или взрослых. Именно поэтому вечером в домашних условиях преобладает использование цифровых устройств [5]. Было показано, что это воздействие высокоэнергетического синего света оказывает подавляющее влияние на выработку мелатонина, сонливость и утреннюю бодрость.

Индустрия здоровья глаз отреагировала на этот вопрос, создав фильтры и приложения, которые фильтруют синий свет с экранов в подходящее время, не влияя на видимость. Кроме того, некоторые производители линз разработали специальные линзы и покрытия, уменьшающие блики, чтобы блокировать высокоэнергетический синий свет. А окулист может помочь определить, какой тип коррекции лучше всего подходит для индивидуальных потребностей [2].

Экспериментальные данные показывают, что воздействие синего света в диапазоне 470–490 нм может быть менее разрушительным по сравнению с синим светом в диапазоне 400–470 нм. Разработка светодиодов с пиковой эмиссией в более безопасном диапазоне может представлять важное улучшение для здоровья глаз [7]. Воздействие синего света на молодых людей должно контролироваться и контролироваться [3]. Со временем накопленные повреждения от воздействия синего света могут увеличить вероятность и тяжесть возрастных заболеваний глаз, таких как дегенерация желтого пятна и катаракта.

Таким образом, здоровая диета с высоким содержанием листовых зеленых овощей и красочных фруктов может помочь повысить уровень защитных пигментов в сетчатке и смягчить некоторые разрушительные эффекты синего света [4]. Хороший сон необходим для внимания, обучения,

настроения и общего благополучия. Также влияние синего света на цикл сна может быть сведено к минимуму путем избегания ярких экранов за 2–3 часа до сна; в поисках внешнего освещения в первые часы дня; ограничения времени просмотра не более двух часов в день для детей в возрасте от 5 до 18 лет, один час в день для детей в возрасте от 2 до 5 лет и полное его исключение для детей в возрасте до 2 лет.

### Список литературы

1. Светодиодное освещение и здоровье. URL: <https://econet.ru/articles/181660-kak-siniy-svet-vliyaet-na-nashe-zdorovie>.
2. Панов Д.Ю., Денисова А.Р. Программа повышения энергоэффективности административных зданий // АПЭКС: сб. ст. по матер. Междунар. науч.-практич. конф. 2017. С. 5–14.
3. Панов Д.Ю. Денисова А.Р. Исследование энергоэффективных мероприятий в административных учреждениях // Интеллектуальный научный потенциал XXI века. Минск, 2017. С. 10–13.
4. Фетисов Л.В., Игнатъев А.Г., Хазиев Р.Р. Разработка энергосберегающих мероприятий в сфере жилищно-коммунального хозяйства // Найновите постижения на Европейската наука – 2014: матер. за X Междунар. науч.-практ. конф. София, 2014. Т. 22. С. 24–27.
5. Панов Д.Ю., Денисова А.Р. Разработка мероприятий по энергосбережению в административных учреждениях // II Поволжская науч.-практ. конф. Казань, 2016. С. 6–8.
6. Иванова В.Р. О вредном воздействии синего излучения светодиодов на органы зрения // Зеленая инфраструктура городской среды: современное состояние и перспективы развития: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2017. С. 46–55.
7. Иванова В.Р., Иванов И.Ю. Ветряные электростанции для электроснабжения промышленных потребителей // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2018. С. 97–98.
8. Иванова В.Р. О влиянии излучения коротковолновой области спектра светодиодов белого свечения на здоровье человека // Экология, здоровье и образование в XXI веке. Глобальная интеграция современных исследований и технологий: матер. III Кавказского экологического форума. Казань, 2017. С. 147–151.



## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Вилия Равильевна Иванова<sup>1</sup>, Александр Викторович Юдин<sup>2</sup>,  
Анатолий Алексеевич Илинбаев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>vr-10@mail.ru, <sup>2</sup>frussia@mail.ru, <sup>3</sup>tolibac@yahoo.com

Солнечная энергетика позиционируется как один из самых перспективных и экологически чистых способов получения электроэнергии. Однако если углубиться в изучение оказываемого влияние данного процесса на окружающую среду, то становятся очевидны некоторые недостатки: большие площади занимаемой территории на единицу получаемой солнечной энергии, необходимость очищения загрязненных элементов, использование токсичных газов, коррозионных жидкостей, опасных летучих веществ при производстве элементов, утилизация модулей с истекшим сроком службы.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, фотоэлектрические установки, фото-вольтаика, экология, экологические проблемы, возобновляемые источники энергии.

## PROMISING ELECTROTECHNOLOGIES

V.R. Ivanova, A.V. Yudin, A.A. Ilinbaev

Solar energy is positioned as one of the most promising and environmentally friendly ways to generate electricity. However, if you delve into the study of the impact of this process on the environment, it becomes obvious some drawbacks: large areas of the occupied territory per unit of solar energy, the need for purification of contaminated elements, the use of toxic gases, corrosive liquids, hazardous volatile substances in the production of elements, disposal of modules with an expired service life.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic installations, photovoltaics, ecology, environmental problems, renewable energy sources.

С каждым этапом развития человечеству необходимо все больше и больше энергии в том или ином ее виде. В настоящее время существует потребность в большом количестве электроэнергии в связи с приходом в абсолютно все сферы нашей жизни большого количества электронных устройств.

Развитие современных технологий влечет за собой появление все более перспективных способов добычи электроэнергии, один из которых – это фотовольтаика, т.е. прямое преобразование солнечной энергии в электрическую [1, с. 7].

Принцип фотовольтаики представляет собой преобразование солнечного излучения в электрическую энергию с помощью полупроводниковых элементов – фотоэлектрических преобразователей. В его основе лежит явление фотоэффекта – взаимодействие частиц света (фотонов) с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электроном вещества.

Получение солнечной энергией в настоящее время является одной из самых перспективных отраслей энергетики из-за своей общедоступности, простоты и большого потенциала. Однако для сбора и использования такой энергии необходим инструментарий, позволяющий осуществлять этот процесс максимально эффективно. С данной целью солнечные элементы, как правило, объединяют в модули – солнечные батареи.

Процесс получения энергии с помощью солнечных батарей является достаточно молодой технологией, появившейся в начале 70-х годов прошлого столетия.

Солнечная батарея – конструкция объединенных фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) – полупроводниковых устройств, преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток. Иными словами – это устройство для выработки электричества из солнечной энергии [2–5].

Солнечная батарея состоит из нескольких объединенных между собой фотоячеек, помещенных в особый защитный корпус, которые создают непрерывную генерацию электрического тока при постоянном наличии солнечного света. Современные технологии позволяют создавать модули с различными характеристиками.

Установилось устойчивое мнение, что именно солнечная энергия является самым экологически чистым источником энергии среди доступным современному человечеству возобновляемых источников, поскольку полученное электричество не оказывает воздействия на человека, природные ресурсы, флору и фауну.

Считается, что единственный негативный эффект получения солнечной энергии – это использование при производстве солнечных батарей токсичных элементов, например, мышьяка. Но при условии внедрения политики повторного использования солнечных батарей и эффективной утилизации данный эффект может считаться незначительным.

Кроме того, солнечные электростанции также практически не загрязняют окружающую среду, поскольку на этапе производства солнечной энергии отсутствуют вредные выбросы в атмосферу. Кроме того, процесс получения подобной энергии не требует топливного обеспечения или ее транспортировки.

Однако если углубиться в изучение оказываемого влияния процесса производства и использования солнечных батарей на окружающую среду и экологическую обстановку, то станет ясно – из-за большого объема производства данный способ получения энергии не является настолько безопасным, как считается.

Данный процесс требует колоссальной площади занимаемой территории на единицу получаемой солнечной энергии. К примеру, солнечные элементы, занимающие  $10 \text{ м}^2$  площади, производят 1 кВт установленной мощности солнечной электростанции. На подобном примере становится понятно, что эффективность данных установок весьма невелика.

Следующая проблема, возникающая при эксплуатации солнечных электростанций – обеспечение необходимого очищения загрязненных элементов батарей. Поскольку солнечные батареи достигают наивысшей эффективности при их размещении в местах с достаточной инсоляцией, размещение их в мегаполисах, особенно в густонаселенных районах, становится неэффективным. Поэтому такие электростанции стараются размещать в пустынях, на полях и т.д. Высокая запыленность, возникающая на данных местностях, влечет за собой необходимость регулярной промывки загрязненных элементов для обеспечения эффективности их работы. Это влечет за собой колоссальные траты дефицитных для данных регионов водных ресурсов, а также необходимость свободного транспортного обеспечения и человеческие трудозатраты для осуществления этой деятельности.

Как было сказано выше, производство солнечных батарей предусматривает использование токсичных газов, коррозионных жидкостей, опасных летучих веществ и т. д. В данном случае возникает вопрос защиты труда и влияния данного производства на окружающую среду.

По сведениям американских экологов стало известно, что в процессе производства солнечных батарей используется до 80 % общемирового объема свинца. Мировые экологические ассоциации утверждают, что производители солнечной энергии обязаны контролировать проблему распространения свинца в окружающей среде.

Следующая проблема – утилизация модулей с истекшим сроком службы. Утечка из отслуживших солнечных батарей вредных для здоровья и окружающей среды веществ в долгосрочной перспективе может подвергнуть опасности здоровье людей в близлежащих районах и сохранность водных и почвенных покровов.

При должном контроле за соблюдением техники безопасности и оснащением предприятий специальными технологиями по улавливанию и очищению вредных веществ производство будет безопасным. Но чаще всего, особенно в развивающихся странах, компании игнорируют необходимость установки данного оборудования.

Однако мировая общественность, национальные торговые организации и экологические ассоциации активно работают над вопросом предотвращения производственных травм и профессиональных заболеваний, негативного влияния на окружающую среду и сокращения использования в производстве природных ресурсов. Компании, занимающиеся производством и установкой солнечных батарей, обязуют представлять в соответствующие контролирующие органы информацию о безопасности производства и его влияния на экологическую обстановку.

Кроме того, международными исследовательскими группами, пропагандирующими безопасные экологические практики в индустрии высоких технологий, разработана добровольная программа для производителей солнечных батарей, в соответствии с которой компании регулярно отслеживают количество выбросов на производстве и эксплуатации своего продукта и предоставляют данные для дальнейших исследований [6].

В настоящее время существует устойчивое мнение, что солнечная энергетика – это панацея от энергетических проблем. Однако нельзя не учитывать те проблемы, которые влечет за собой эта новая перспективная технология. Поэтому необходимо поддерживать инициативы по контролю за экологической обстановкой. Только совместными усилиями производителей, потребителей и государства новые технологии смогут стать настоящим благом для человечества.

### **Список литературы**

1. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.
2. Солнечная энергетика: учебное пособие / В. И. Виссарионов [и др.]. М.: МЭИ, 2008. 601 с.
3. Говорушко С.М. Экологические последствия использования энергии океана // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 1. С. 51–57.
4. Photovoltaics // Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Photovoltaics&oldid=872690622>.
5. Иванова В.Р. О проблемах и перспективах использования солнечной энергии // Матер. XVIII Междунар. симп. «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» и XIX Междунар. специализ. выставка «Энергетика. Ресурсосбережение – 2018». Казань, 2018. С. 200–203.

6. Идрисова А.Р., Роженцова Н.В. Эксплуатационная надежность кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов: Казань, 2016. С. 100–101.

УДК 621.311.153.001.24

## **УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ КРАНЫ РЕЧНЫХ ПОРТОВ**

Дмитрий Юрьевич Платонов<sup>1</sup>, Наталья Дмитриевна Голубева<sup>2</sup>,  
Валентин Павлович Степанов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара

<sup>1</sup>brounco@yandex.ru, <sup>2</sup>dinatalia2012@yandex.ru, <sup>3</sup>aees@rambler.ru

Актуальность работы обуславливается тем, что расчетные потери не могут быть измерены, а определяются только расчетным путем. На практике оценка расчетных потерь электрической энергии производится по ступенчатым графикам электрической нагрузки. Последнее является причиной возникновения погрешностей в оценке коэффициента формы и, следовательно, составляющих расчетных потерь электрической энергии.

Уточнение достигается учетом особенностей графика нагрузки, заключающихся в его резкопеременном характере и корреляционной функцией, описывающей вероятностную взаимосвязь между ординатами графиков кранов речных портов. Показано, что погрешность в оценке дисперсионной составляющей расчетных потерь электрической энергии находится в диапазоне от 10 до 46 % в зависимости от типов кранов и вида грузов. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования методики оценки расчетных потерь электрической энергии.

**Ключевые слова:** краны речных портов, графики электрической нагрузки, корреляционная функция графика, расчетные потери электрической энергии, дисперсионная составляющая расчетных потерь электрической энергии.

## **REFINEMENT OF ESTIMATED LOSSES OF ELECTRIC ENERGY IN NETWORKS, FEEDING CRANES OF RIVER PORTS**

D.Yu. Platonov, N.D. Golubeva, V.P. Stepanov

The relevance of this paper is based on the fact that the calculated losses cannot be measured, but determined only by calculation. In reality the estimate of the calculated active electric power losses is made by stepped graphic of the electric load. The latter is the cause of errors in the evaluation of the form factor and, consequently, components of the calculated losses of electrical energy. The refinement is achieved by taking into account the features of the electrical load graph, consisting in the abrupt nature of the load

diagram with a form factor and exponential-sine-cosine correlation function, reflecting the technological process of loading. It is shown that the accuracy in estimating the dispersion components of the calculated energy losses are in the range from 10 to 46 % depending on the cranes and the cargo types.

The results of this paper can be used to improve the methodology for assessing the calculated energy losses.

**Keywords:** river port cranes, electric load diagrams, correlation function of the diagram, the dispersion component of the calculated losses of electric energy.

Целью работы является уточнение дисперсионной составляющей расчетных потерь  $\Delta W_D$  электроэнергии в системах электроснабжения питающих краны речных портов, за счет учета коэффициента формы  $K_\Phi$  исходного графика на  $\theta$ -ступеньках и вида корреляционной функции  $K(\tau)$ , а также ее параметров.

Причиной возникновения погрешности в оценке дисперсионной составляющей расчетных потерь электрической энергии  $\delta(\Delta W_D)$  в элементах системы электроснабжения является использование для оценки расчетных потерь электрической энергии  $\Delta W_{al}$  ступенчатого графика электрической нагрузки  $I_\theta(t)$  [1]:

$$\Delta W_{al} = 3I_c^2 K_{\Phi\theta}^2 RT_p. \quad (1)$$

Используя известное соотношение, для ступенчатого графика электрической нагрузки (ГЭН)  $I_\theta(t)$  [2]:

$$K_{\Phi\theta}^2 = 1 + \frac{DI_\theta}{I_c^2} \quad (2)$$

выражение (1) преобразуется к виду:

$$\Delta W_{al} = 3I_c^2 RT_p + 3DI_\theta RT_p = \Delta W_c + \Delta W_{D\theta}, \quad (3)$$

где  $\Delta W_c$  и  $\Delta W_{D\theta}$  представляют собой две составляющие  $\Delta W_{al}$ : от средней нагрузки  $I_c$  и дисперсии нагрузки  $DI_\theta$  ступенчатого  $I_\theta(t)$  ГЭН.

Впервые уточнение  $\Delta W_{D\theta}$  по ступенчатым ГЭН  $I_\theta(t)$  было приведено в [2]. Уточнение относилось к промышленным электрическим сетям, питающим общепромышленные электроприемники (ЭП). Графики нагрузок общепромышленных ЭП имеют спокойный характер с  $K_\Phi < 1,1$  и экспоненциальной корреляционной функцией (КФ) вида [2]:

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|}. \quad (4)$$

Постоянная времени корреляции для КФ вида (4) определяется выражением:

$$T_k = \frac{1}{\alpha}. \quad (5)$$

В [3] показано, что погрешность в оценке  $\Delta W_{D\theta}$  может достигать 25 % в зависимости от увеличения коэффициента формы  $\delta(K_\Phi)$ :

$$\delta(K_\Phi) = K_\Phi - K_{\Phi\theta}. \quad (6)$$

Для оценки  $K_\Phi$  исходного ГЭН воспользуемся важнейшей формулой метода вероятностного моделирования [3]:

$$DI_\theta = \frac{2}{\theta^2} \int_0^\theta d\tau \int_0^\tau K(\tau) d\tau, \quad (7)$$

которая связывает через КФ  $K(\tau)$  дисперсии исходного  $DI$  и ступенчатого  $DI_\theta$  ГЭН. Кроме этого результаты опытных и теоретических исследований ГЭН различных кранов при работе с лесными, навалочными и штучными грузами описывается КФ вида [4]:

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{1}{k_\omega} \sin \omega_0 \tau \right), \quad (8)$$

в котором  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\omega_0$  – собственная частота колебаний;  $k_\omega = \omega_0/\alpha$  – коэффициент колебательности КФ ГЭН.

Тогда выражение для КФ графиков с КФ вида (8) получается подстановкой  $DI_\theta$ , полученного в [5]:

$$DI_\theta = \frac{2DI}{m^2(1+k_\omega^2)} \left( 1 - e^{-m} \cos(k_\omega m) - \frac{1}{k_\omega} e^{-m} \sin(k_\omega m) \right), \quad (9)$$

в выражение (2):

$$K_\Phi = \sqrt{1 + \frac{m^2 (K_{\Phi\theta}^2 - 1)(1 + k_\omega^2)}{2 \left[ 1 - e^{-m} \cos(k_\omega m) - \frac{1}{k_\omega} e^{-m} \sin(k_\omega m) \right]}}. \quad (10)$$

Время корреляции  $T_k$  ГЭН с КФ вида (8) определяется выражением [3]:

$$T_k = \frac{2e^{\frac{-\pi}{2k_\omega} e^{\frac{1}{k_\omega} \arccos \frac{k_\omega}{\sqrt{1+k_\omega^2}}}}}{\alpha \sqrt{1+k_\omega^2} \left[ 1 - e^{\frac{-\pi}{k_\omega}} \right]}. \quad (12)$$

Как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, проведенных в [4],  $k_\omega$  ГЭН кранов речных портов при работе, например, с навалочным грузом изменяется в диапазоне от 3,2 до 3,6. Коэффициент затухания  $\alpha$  изменяется в пределах от 0,023 до 0,026, а среднее значение  $\omega_0 = 0,083$ . Поэтому  $T_k$  для исходных ГЭН находится в диапазоне от 33 до 78 мин, а коэффициент формы  $K_{\phi\theta}$  ступенчатого ГЭН изменяется от 1,15 до 1,2.

Результаты расчетов  $K_\phi$  исходных ГЭН кранов речных портов при работе с навалочным грузом представлены на рис. 1 в виде области, ограниченной предельными значениями коэффициента формы  $K_{\phi\theta} = 1,15$  и  $K_{\phi\theta} = 1,2$ , а также параметра  $m = \theta/T_k = 0,37$  и  $m = 0,88$ .

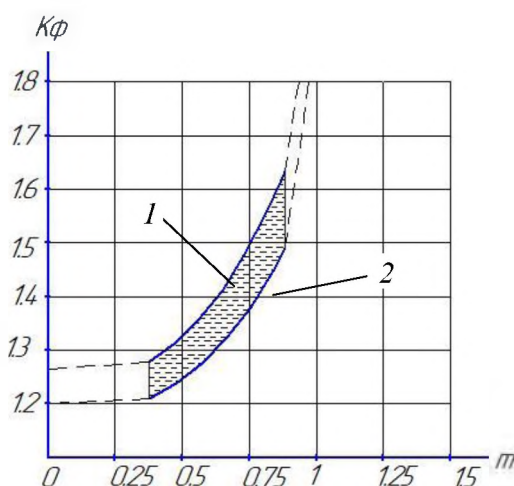


Рис. 1. Зависимость коэффициента формы  $K_\phi$  исходного ГЭН от параметра  $m$

и коэффициента формы  $K_{\phi\theta}$  ступенчатого графика ( $k_\omega = 3,2 \div 3,6$ ):

кривая 1 –  $K_{\phi\theta} = 1,2$ ; кривая 2 –  $K_{\phi\theta} = 1,15$

Расчеты коэффициента формы исходного графика приведены для ступенчатого ГЭН  $I_\theta(t)$  с параметрами  $\theta = 30$  мин и  $T_k = 33\text{--}78$  мин, что соответствует  $m = 0,37$  и  $m = 0,88$ .



Анализ зависимости на рис. 1 свидетельствует, что увеличение коэффициента формы  $\delta K_\Phi$  на ступеньках  $I_\theta(t)$  согласно (6) находится в пределах от 1,21 до 1,63. Поэтому дисперсионная составляющая расчетных потерь электроэнергии  $\Delta W_{D\theta}$  по ступенчатым графикам всегда меньше дисперсионной составляющей  $\Delta W_D$  по исходному графику согласно выражению:

$$\delta(\Delta W_a) = \frac{\Delta W_D - \Delta W_{D\theta}}{\Delta W_D} \cdot 100\% = \frac{K_\Phi^2 - K_{\Phi\theta}^2}{K_\Phi^2} \cdot 100\%.$$

На рис. 2 изображена кривая увеличения расчетных потерь электроэнергии в зависимости от увеличения коэффициента формы  $\delta K_\Phi$  на ступеньках графика при работе с «навалочным» грузом. Оценка дисперсионной составляющей расчетных потерь электроэнергии для ГЭН кранов речных портов при работе с грузами, отличных от «навалочных», составляет предмет отдельной работы авторов.

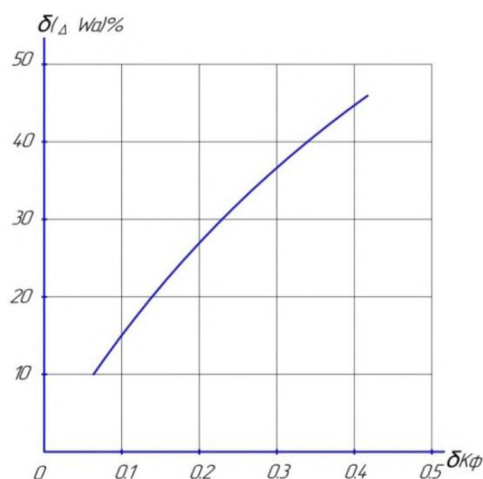


Рис. 2. Зависимость расчетных потерь ЭЭ от увеличения коэффициента формы графика

Заметим, что количественной оценке  $\Delta W_D$  в промышленных электрических сетях, питающих дуговые сталеплавильные печи, электроприемники (ЭП) производства строительной керамики и шахт по добыче угля посвящена работа [6].

Дополнительные расчетные потери электроэнергии обусловлены увеличением дисперсионной составляющей расчетных потерь электроэнергии и находятся в диапазоне от 10 до 46 % для кранов речных портов при работе с навалочным грузом.

## Список литературы

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в электрических сетях. М.: Нц ЭНАС, 2006. 280 с.
2. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
3. Основы построения промышленных электрических сетей / Г.М. Каялов [и др.]. М.: Энергия, 1978. 352 с.
4. Шошмин Б.А. Исследование особенностей электрических нагрузок и разработка методов их расчета для порталных кранов речных портов.: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Ленинградский ин-т речного и морского транспорта. Л., 1974. 24 с.
5. Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчётах характеристик электрических нагрузок потребителей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2003. 220 с.
6. Оценка расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные промышленные установки / Н.В. Безменова [и др.] // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 3. С. 34–37.

УДК 621.3.048

## РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО УСТРОЙСТВА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Дмитрий Алексеевич Иванов<sup>1</sup>, Андрей Александрович Потанин<sup>2</sup>,  
Амир Динарович Арсланов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>ivanov.da@kgeu.ru, <sup>2</sup>gornego.tes@gmail.com, <sup>3</sup>arslanovad97@mail.ru

В статье описано разработанное портативное устройство, позволяющее проводить визуальный контроль и поиск неисправного высоковольтного оборудования на объектах энергетики.

**Ключевые слова:** портативное устройство, бесконтактная диагностика, высоковольтный изолятор, высоковольтное оборудование, энергетика, неразрушающий контроль, визуальный осмотр.

## DEVELOPMENT OF A PORTABLE DEVICE FOR VISUAL CONTROL OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

D.A. Ivanov, A.A. Potanin, A.D. Arslanov

The article describes a developed portable device that allows for visual inspection and search for faulty high-voltage equipment at energy facilities.

**Keywords:** portable device, contactless diagnostics, high-voltage insulator, high-voltage equipment, energetics, non-destructive testing, visual inspection.

Известно, что в высоковольтных диэлектрических элементах, составляющих наиболее уязвимую часть электроэнергетического оборудования, изменение во времени его параметров и характеристик обусловлено электрофизическими процессами, происходящими под действием приложенного напряжения. В целом, аварийность линий передач, мощных подстанций на 40–50 % связана с повреждениями изоляции, особенно это касается высоковольтных изоляторов. Механизмы нарушения работоспособности диэлектрических элементов определяются общими физическими процессами, приводящими к изменению структуры и возникновению дефектов на поверхности и в объеме данных элементов.

Конкретные механизмы нарушений работоспособности диэлектрических элементов определяются общими физическими процессами изменений структуры, свойств и параметров данных элементов. Причем закономерности, характеризующие эти процессы, могут являться основой для построения некоторых общих физических моделей дефектов и последующим электрическим пробоем. К общим физическим моделям отказов и процессов их возникновения в диэлектрических элементах можно отнести следующие: электрическое разрушение; тепловое разрушение; электрохимическую коррозию; электротермическую эрозию. В высоковольтном энергетическом оборудовании находящимся под рабочим напряжением изменение во времени параметров и характеристик составляющих его элементов, обусловленное происходящими в них электрическими, тепловыми и физико-химическими процессами, являются наиболее общей причиной отказов элементов.

Основным механизмом возникновения электрического микроразряда в любых диэлектриках является ударная полевая ионизация материалов и сред. При движении в диэлектрике электроны проводимости отдают часть своей кинетической энергии, полученной от электрического поля, атомам и ионам вещества, вызывая его полевую ионизацию. Разрушение диэлектрика в стадии теплового пробоя значительно больше, чем в стадиях возникновения и формирования разряда. В стадии теплового пробоя (стадии разрушения) выделяется энергия, по крайней мере, на три порядка большая, чем в стадиях возникновения и формирования разряда.

Изучение механизмов электрофизических процессов позволит установить их влияние не только на возникновение и рост дефектов в ходе эксплуатации, но и разработать комплексный способ контроля параметров дефектов и их влияние на электрические и прочностные свойства диэлектрических элементов.

В настоящее время в качестве диэлектрических элементов изоляции все чаще используются полимерные материалы, но для высоковольтных изоляторов широко применяют электротехнический фарфор. Отличие в физико-химической структуре этих материалов приводит и к различию основных дефектов, возникающих в процессе деградации. Для полимеров характерны дефекты в виде дендритных структур, возникающих в объеме и на поверхности, а также газовых полостей в объеме материала. Для керамических материалов характерны трещины и сколы на поверхности, а также дефекты на границах диэлектрика и металлических электродов.

Структурные неоднородности в виде кластеров примесных ионов, естественных или индуцированных доменов и доменных структур, многофазных компонентов, а также дефекты в виде пор, трещин, дендритов, имеют различие в диэлектрической проницаемости, электропроводности и механической прочности. Вследствие этого, в микро- и наноразмерной областях на границах таких неоднородностей и дефектов возникают градиенты электрических полей, близких к пробойным значениям, даже при приложении номинальных рабочих напряжений для данных приборов и устройств. Подобные особенности наиболее характерны для элементов высоковольтной полимерной и керамической изоляции (опорные и проходные изоляторы, вводы, изоляция кабелей и трансформаторов). В диэлектриках с достаточно длинным периодом диэлектрической релаксации происходит накопление зарядов на границах неоднородностей и дефектов, что может приводить к возникновению частичных разрядов (ЧР). Их интенсивность, как показали предварительные эксперименты, может достигать значений порядка нескольких пикокулон (пС); этих значений достаточно для возникновения ЧР. Интенсивность и частота повторений ЧР возникают с увеличением приложенного электрического поля. Длительность ЧР в микро- и наноразмерном масштабах происходит во временных интервалах 10–100 нс. До определенных значений интенсивности ЧР не вызывает деструктивных процессов. Поэтому такие ЧР можно рассматривать как незавершенные пробои, и их появление свидетельствует только о наличии микро- или наноразмерных неоднородностей и дефектов. С увеличением интенсивности выше определенного предела, отличающегося для различных материалов, ЧР могут вызывать деструкционные процессы, приводящие в конечном итоге к электрическому пробое и разрушению материала или изделия.

Сами частичные разряды уже около тридцати лет являются основой способа диагностики дефектного состояния изоляции высоковольтного оборудования. Об этом свидетельствует факт введения нормативных значений ЧР в разделы по испытаниям электрической изоляции. Однако до настоящего времени этот метод, как и определяется ГОСТ 20074-83 и международным стандартом IEC 60270, относится только к контактными методам и в основном применяется в заводских лабораторных испытаниях в России и за рубежом. Также отсутствуют как нормативные документы, так и промышленные образцы установок для дистанционного бесконтактного измерения параметров ЧР без чего невозможен точный анализ степени дефектности таких объектов, как изоляторы высоковольтных линий электропередач. В отдельных лабораторных установках, как правило, используется только какой-либо способ бесконтактного измерения параметров ЧР. Особенностью данной работы является разработка комплексного способа измерения необходимого и достаточного набора параметров ЧР (интенсивность, частота повторения, начало и конец возникновения) с привязкой данных параметров к фазе переменного напряжения. Для этой цели предлагается синхронно использовать два типа датчиков, регистрирующих электромагнитные и акустические сигналы от ЧР, что позволит использовать разработанное устройство в полевых условиях и в любое время суток.

Наиболее разработанными методами бесконтактной диагностики высоковольтных изоляторов являются методы, основанные на регистрации теплового, электромагнитного, акустического и оптического излучения, генерируемого частичными разрядами.

Выявление всевозможных дефектов особенно важно при пуске и наладке оборудования. УФ-инспекция не зависит от нагрузки сети и от фазных токов. Поэтому нет необходимости в токовой нагрузке линии для наблюдения за короной. В отличие от тепловизионного метода контроля, диагностика с помощью УФ-камер позволяет обнаруживать местоположение дефектных узлов, такие как пробитые изоляторы, загрязненные поверхности, поврежденные полимерные изоляторы, поврежденные конструкции или неправильно настроенные и установленные компоненты. Растет и потребность в применении УФ-инспекции для обнаружения частичных разрядов на обмотках двигателей и сухих трансформаторах. Высокая чувствительность и узкое поле зрения ультрафиолетовых камер

позволяет инспектору производить съемку с расстояния до 150 м. Известно, что тепловизоры обнаруживают только участки с повышенной или пониженной температурой, ультрафиолетовые камеры обнаруживают коронный и дуговой разряды, поэтому с их помощью оборудование и компоненты, имеющие дефекты, могут быть обнаружены до того, как обнаружен градиент температуры.

Из отечественных разработок стоит отметить прибор Филин-6. Прибор выполнен на телеобъективе из специального кварцевого стекла, имеющего почти 100 % пропускание в области ультрафиолета. Повышение чувствительности было достигнуто за счет применения встроенного импульсного высоковольтного блока питания, с регулируемой частотой 50 Гц и скважностью.

На данный момент ведется разработка устройств, предназначенных для бесконтактного контроля состояния высоковольтных изоляторов. Известны работы, в которых предлагается использование анализаторов электромагнитного поля для решения данной задачи. Критерием отбраковки в этих устройствах является контроль распределения электромагнитного излучения по частотам. Также известны работы, в которых анализируются отдельные электромагнитные импульсы частичных разрядов.

Наиболее информативным в этом плане является анализ параметров электромагнитных импульсов ЧР с учетом при этом фазового распределения сигналов в сетях переменного тока, поскольку попытки использования результатов подобного анализа отдельных сигналов ЧР без привязки к фазе сети пока не дали столь достоверных результатов по оценке рабочего состояния и остаточного ресурса изоляторов.

В разрабатываемой нами системе импульсные сигналы от исследуемых образцов ПИ регистрируются бесконтактно с помощью активной антенны. Проведенные эксперименты показали соответствие ЧР, измеряемых различными датчиками по фазе возникновения и амплитуде импульса.

Мы разработали конструкцию портативного прибора, позволяющего визуально определять дефекты в высоковольтном оборудовании. Схема использования устройства приведена на рис. 1. В состав устройства входят акустический датчик, электромагнитный датчик, мобильный телефон с видеокамерой, программное обеспечение. Для выявления неисправного оборудования необходимо направить устройство камерой телефона на обследуемый участок объекта. Входящие в состав комплекса датчики выявляют

сигналы с неисправного оборудования, и с помощью установленного на телефоне программного обеспечения накладывают интенсивность сигнала с датчиков на картинку с камеры (рисунок).

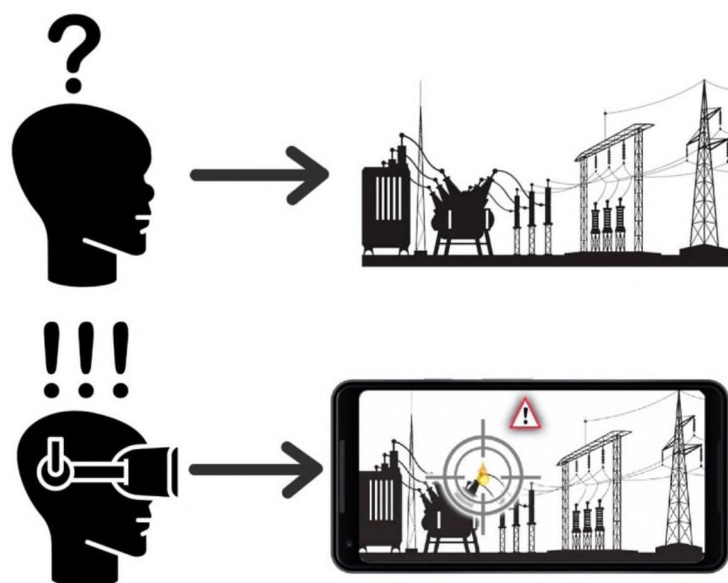


Рис. 1. Схема использования портативного устройства

Выявление дефектных изоляторов из общей системы высоковольтных изоляторов, находящихся под рабочим напряжением и расположенных на определенных расстояниях друг от друга на распределительных узлах и подстанциях, представляет весьма сложную задачу. Исходя из этих условий нами, был разработано портативное устройство для визуального выявления неисправных изоляторов и другого высоковольтного оборудования на объектах энергетики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00203.

### Список литературы

1. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов [и др.] // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 87–93.
2. Real-Time Operating Systems for Wireless Modules / D.A. Yaroslavsky [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 11. P. 1168–1171.
3. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module / D.A. Ivanov [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13(6). P. 2358–2362.

4. Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors / D.A. Yaroslavsky [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 12(22). 2017. P. 6479–6482.

5. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации / А.В. Голенищев-Кутузов [и др.] // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 10–14.

6. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 99–107.

УДК 620.178.5:62-13

## **АНАЛИЗ ИНТЕГРАЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ ВИБРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЛИНИИ РАФИНЕРА ХВОЙНОГО ПОТОКА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Алина Ринатовна Денисова<sup>1</sup>, Ольга Леонидовна Николаева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>ilinaolecka@gmail.com

В данной статье рассмотрена ресурсосберегающая эксплуатация электрооборудования по фактическому техническому состоянию с помощью автоматизированных систем мониторинга.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, виброметрия, электрооборудование, электродвигатель, ресурсосбережение.

## **ANALYSIS OF INTEGRATION IN THE STATIONARY VIBROMETRIC SYSTEM OF DIAGNOSTICATION OF ROTARY EQUIPMENT IN THE LINE OF REFINER OF CONCRETE FLOW OF A PAPER MACHINE**

A.R. Denisova, O.L. Nikolaeva

Resource-saving operation of electrical equipment on the actual technical condition with the help of automated monitoring systems.

**Keywords:** vibrodiagnostics, vibrometry, electrical equipment, electric motor, resource saving.

Своевременное выявление и устранение дефектов оборудования в процессе эксплуатации являются важными задачами технического персонала любого промышленного предприятия. Диагностированные и устраненные



дефекты любого характера на ранних стадиях при использовании машин значительно повышают как экономическую, так и финансовую эффективность.

На данном этапе развития промышленности опыт эксплуатации показывает экономическую неэффективность проводить плановые замены механических узлов электрических машин. Предприятиям на много выгоднее перейти на ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию, что разрешено соответствующими национальными стандартами Российской Федерации: ГОСТ Р 53565-2009 «Мониторинг состояния оборудования опасных производственных объектов. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов» и ГОСТ Р 53564-2009 «Мониторинг состояния оборудования опасных производств.

Текущий контроль осуществляется по таким параметрам как: нагрев двигателя, посторонний шум, уровень вибрации, отклонение тока от номинального и т.д. Зачастую по графикам планового предупредительного ремонта менялись абсолютно рабочие подшипники, и дело было не в них, а к примеру, в старых разрушенных фундаментах, расцентровки, разбалансировки и т. п.

Одним из наиболее актуальных вопросов является своевременный виброанализ электрооборудования для предупреждения аварий. Вибродиагностику условно можно разделить на 2 типа:

1. Приглашение специалистов по виброметрии на производство с переносными специальными приборами.
2. Внедрение стационарной системы на особо важные (дорогие) узлы – электродвигатели, редуктора, исполнительные механизмы.

Пьезодатчики вибрации позволяют измерять совместно три вибропараметра: виброускорение, виброскорость и виброперемещение. Совместный анализ виброускорения, виброскорости, виброперемещения, их скоростей роста, стохастических и спектрально-корреляционных характеристик вибропараметров позволяет выявить дефекты на стадии зарождения. Обнаружение дефектов подшипников качения осуществляется посредством анализа сигнала вибрации в частотной и временной областях и дает возможность определения степени развития дефектов подшипников с целью определения остаточного ресурса.

Спектр и форма сигнала вибрации содержат информацию о характерных дефектах подшипников качения, эта информация имеет специфические особенности в зависимости от вида дефекта. Одной из таких характерных особенностей является наличие несинхронных пиков, т. е. пиков, не являющимися целократными гармониками частоты вращения вала машины. Спектр вибрации может содержать как дискретные пики, так и широкополосные частотные области высокого уровня. Во временном сигнале вибрации могут наблюдаться ударные импульсы, обусловленные прохождением (перекатыванием) элементов качения через дефекты дорожек или контактом дорожек с дефектными участками элементов качения.

Далее данные собираются, анализируются и хранятся в специальном вычислительном центре, состоящем из контроллеров, серверов и ПК, образуя собой полноценный диагностический комплекс.

Система мониторинга позволит избежать необоснованных и аварийных ремонтов и существенно увеличить межремонтный период эксплуатации оборудования.

Она автоматически осуществляет в реальном времени:

- диагностику и прогнозирование основных неисправностей оборудования с ранним обнаружением;
- предупреждение персонала о текущем состоянии оборудования;
- формирование планов целенаправленных ремонтов на основе фактического состояния оборудования;
- выявление и ликвидацию фундаментальных причин отказов оборудования;
- оптимизацию технологических схем и состава оборудования.

Системы виброметрии имеют открытую архитектуру, распределенную систему датчиков, контролирующих основные параметры оборудования; распределенную систему выносных модулей, обеспечивающих первичное преобразование сигналов с датчиков и их трансляцию в диагностический контроллер, а также обеспечивающих контроль за целостностью самих датчиков и линий связи; диагностическую станцию, обеспечивающую сбор, хранение, обработку данных, отображение результатов мониторинга; диагностическую сеть предприятия для предоставления на компьютерах пользователей (от персонала цеха до руководства предприятия) полной и своевременной информации о техническом состоянии оборудования.

В данной статье рассматривается перспектива внедрения системы виброметрии в узел рафинера хвойного потока. Рафинер (рис. 1) представляет собой агрегат из трех основных составляющих:

- 1) электродвигатель Siemens 1LA8357-4AB60 500 кВт;
- 2) редуктор KYMERA;
- 3) рафинер (устройство перемалывания хвойной массы – мельница).

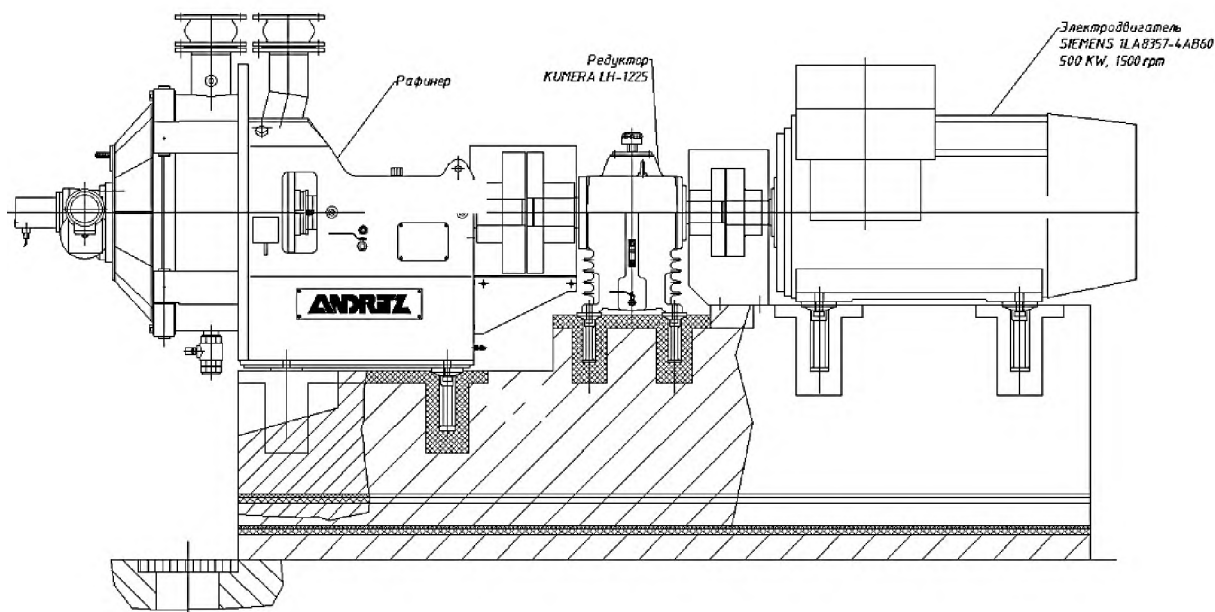


Рис. 1. Устройство Рафинера

Электродвигатель имеет шариковые подшипники качения SKF 6220. Задний подшипник электроизолированный, покрыт эмалью. Стоимость комплекта варьируется до 1 100 Евро, к ним прибавляются временные затраты на замену. Номинальный срок службы подшипников зависит от ряда факторов: нагрузка на подшипник, частота вращения, динамическая грузоподъемность, тип подшипника (шариковый или роликовый, качения или скольжения). Срок службы также может быть увеличен за счет своевременной замены смазки, подбора необходимой смазки для данного оборудования согласно технологическим параметрам контроля соосности агрегатов, контроля баланса рабочих колес или ротора.

Установка датчика (рис. 2) с помощью крепежной шпильки (или крепление с помощью специального клея) является наиболее правильной и надежной. Основными преимуществами такой установки являются

возможность правильно измерять вибрации низкого уровня и высокочастотные вибрации, т.к. при такой установке собственная (резонансная) частота самого датчика расположена выше измеряемого частотного диапазона.

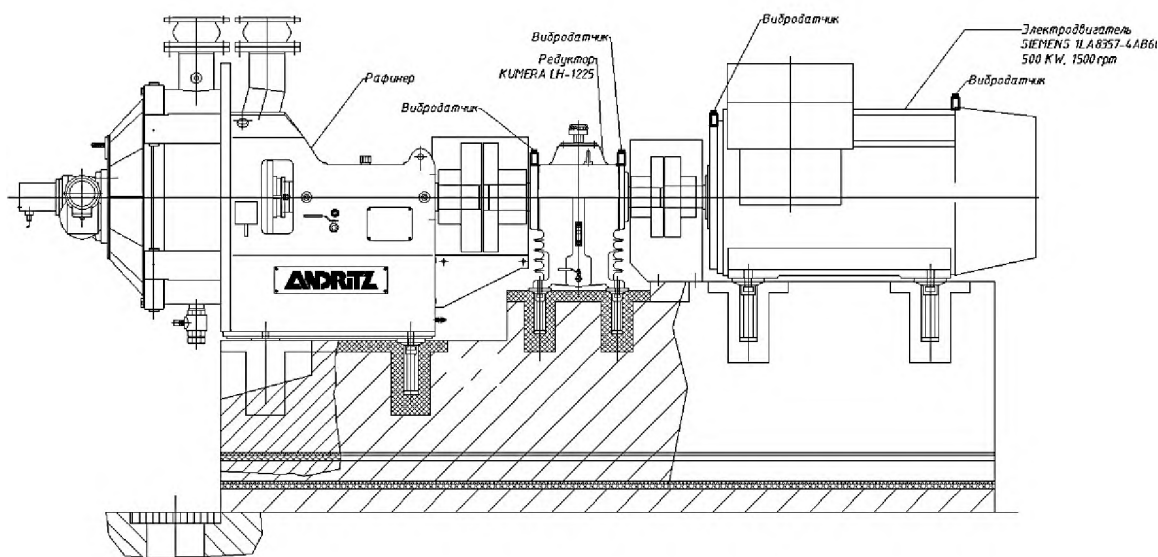


Рис. 2. Местоооложение датчиков в установке

С помощью системы можно производить следующие измерения:

- абсолютная вибрация корпусов подшипников;
- относительная вибрация (вала);
- осевой сдвиг ротора;
- искривление ротора;
- наклоны опорных конструкций;
- частота вращения ротора и фазовая отметка

Дополнительно по необходимости в систему возможно включить дополнительные температурные датчики, показания тока амперметров для полной величины картины при мониторинге.

Данная система имеет огромное преимущество перед переносными виброанализаторами, так как снижается время диагностики, контроль ведется в режиме реального времени, что в свою очередь ведет к снижению затрат на диагностику.

Своевременное выявление и устранение дефектов оборудования в процессе эксплуатации с помощью стационарных систем вибродиагностирования является наилучшим техническим решением в области данной

диагностики. Наибольшую эффективность с точки зрения обслуживания даст максимально развитая система с наибольшим количеством точек мониторинга.

### **Список литературы**

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. 2-е изд. исправл. М.: Машиностроение, 2000. 344 с.
2. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам // Судостроение. 1985. № 3. С. 21–23.
3. Проблемы обеспечения надежности распределительных сетей промышленных предприятий / Н.В. Роженцова [и др.] // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 3–4. С. 85–93.
4. Диагностика электрооборудования промышленных предприятий: программа, методические указания и контрольные задания / Н.В. Роженцова [и др.] // Казань, КГЭУ, 2006. С. 2–4.

### Секция 3. ЭНЕРГОСИЛОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.331

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПУЛЬСОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Александр Юрьевич Еланский<sup>1</sup>, Ксения Викторовна Титоренко<sup>2</sup>,  
Леонид Сергеевич Лабунский<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО СамГУПС, г. Самара

<sup>1</sup>bong.blfamily@mail.ru, <sup>2</sup>titorenkok@mail.ru, <sup>3</sup>labunski@yandex.ru

Произведено моделирование схемы 12-пульсового выпрямителя с учетом реальных параметров в программах «ElectronicsWorkbench» и «NIMultisim».

**Ключевые слова:** многопульсовый выпрямитель, тяговое электроснабжение, моделирование выпрямителей.

#### MODELING MANY PULSE RECTIFIER BASED

A.Yu. Elansky, K.V. Titorenko, L.S. Labunsky

The modeling of the 12-pulse rectifier circuit is made taking into account the real parameters in the programs «ElectronicsWorkbench» and «NI Multisim».

**Key words:** multi-pulse rectifier, traction power supply, rectifier modeling.

Перед разработкой любых радиоэлектронных и электротехнических устройств производится, как правило, физическое или математическое моделирование. Физическое моделирование требует больших материальных затрат, так как необходимо изготовление макетов и их исследование, которое бывает достаточно сложным. Поэтому обычно осуществляют математическое моделирование с применением специальных программ.

В рамках дисциплины «Электронная техника и преобразователи» изучаются различные схемы выпрямителей и анализируется принцип их работы. Курс лабораторных работ предусматривает моделирование схем в программе «ElectronicsWorkbench» и проверку результатов моделирования на лабораторном стенде СЭ1-ВН-С-К производства ООО «Учебная техника». При выполнении лабораторных работ выяснилось, что результаты моделирования и измерения на лабораторном стенде не совпадают. Причиной является то, что программа использует идеальные элементы схемы, вследствие чего возникает погрешность. Задачей настоящего исследования является использование реальных параметров элементов схемы лабораторного стенда для корректировки моделируемой схемы.

В настоящее время авторами разработаны модели многопульсовых выпрямителей [2, 5] в программе «ElectronicsWorkbench». Пример модели 12-пульсового выпрямительного агрегата с учетом реальных параметров элементов представлена на рис. 1.

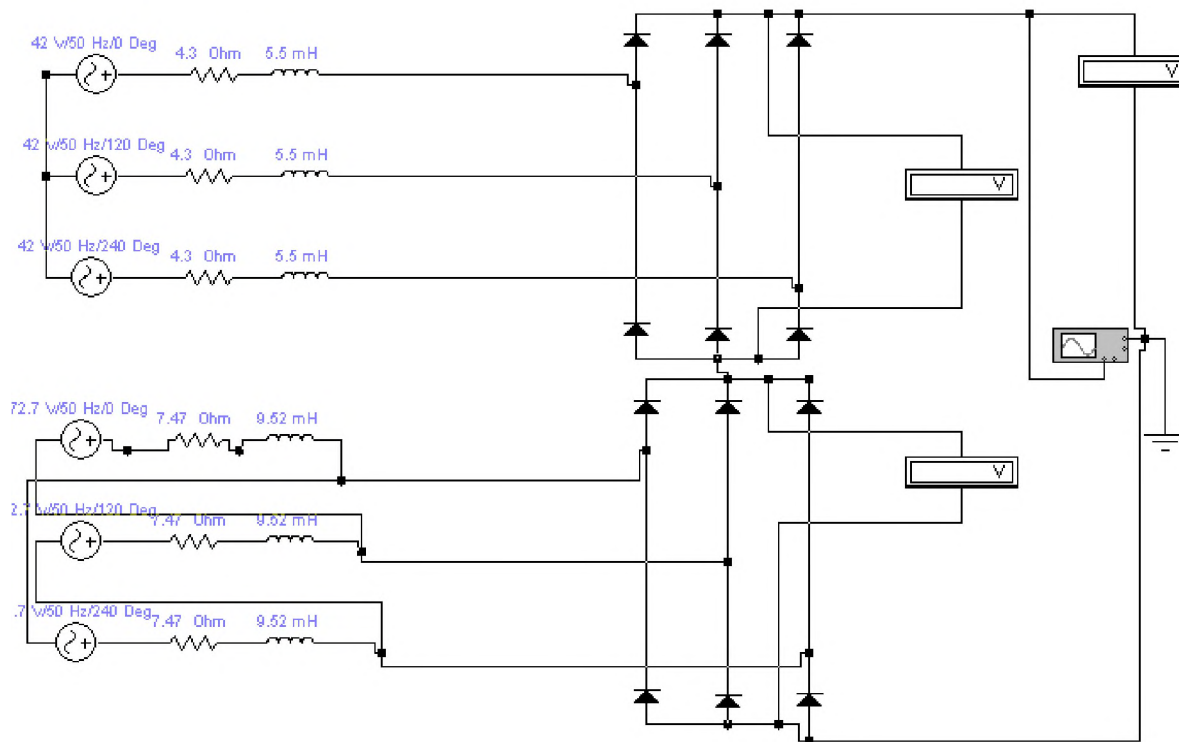


Рис. 1. Модель трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя в программе «ElectronicsWorkbench»

12-пульсовая схема состоит из двух последовательно включенных 6-пульсовых схем, у которых сдвиг линейных напряжений вторичных обмоток трансформаторов должен составлять  $30^\circ$  эл. Это достигается за счет соединения обмоток трансформаторов по схемам звезда – звезда и звезда – треугольник.

Последняя версия программы «ElectronicsWorkbench» была выпущена в 1999 г., на сегодняшний день является устаревшей и имеет ряд недостатков. В программе «ElectronicsWorkbench» возможно использовать только стандартные трансформаторы из встроенной библиотеки, поэтому при моделировании многопульсовых выпрямителей вторичные обмотки трансформаторов были смоделированы на источниках переменного тока.

Поэтому было принято решение использовать современный электронный моделировщик – «NI Multisim», имеющий более широкие возможности моделирования.

Для примера создадим модель 12-пульсового выпрямителя (рис. 2), временные характеристики которого представлены на рис. 3.

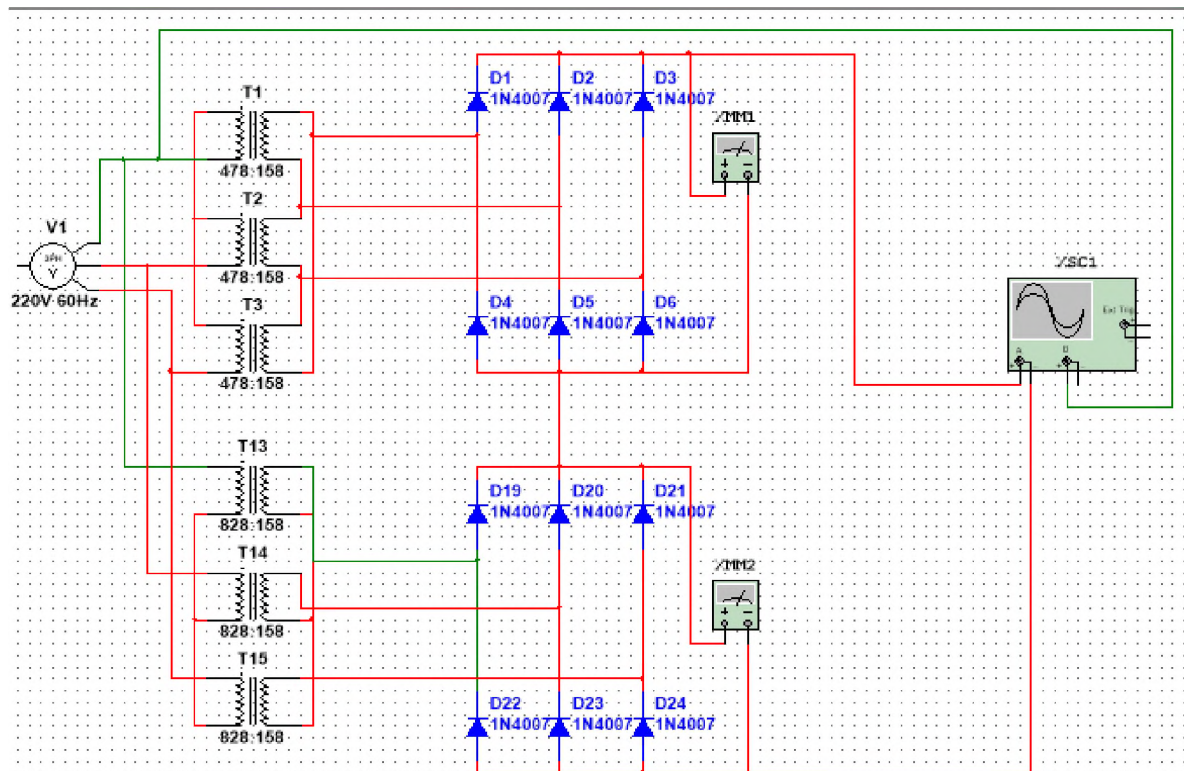


Рис. 2. Модель трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя в программе «NIMultisim»

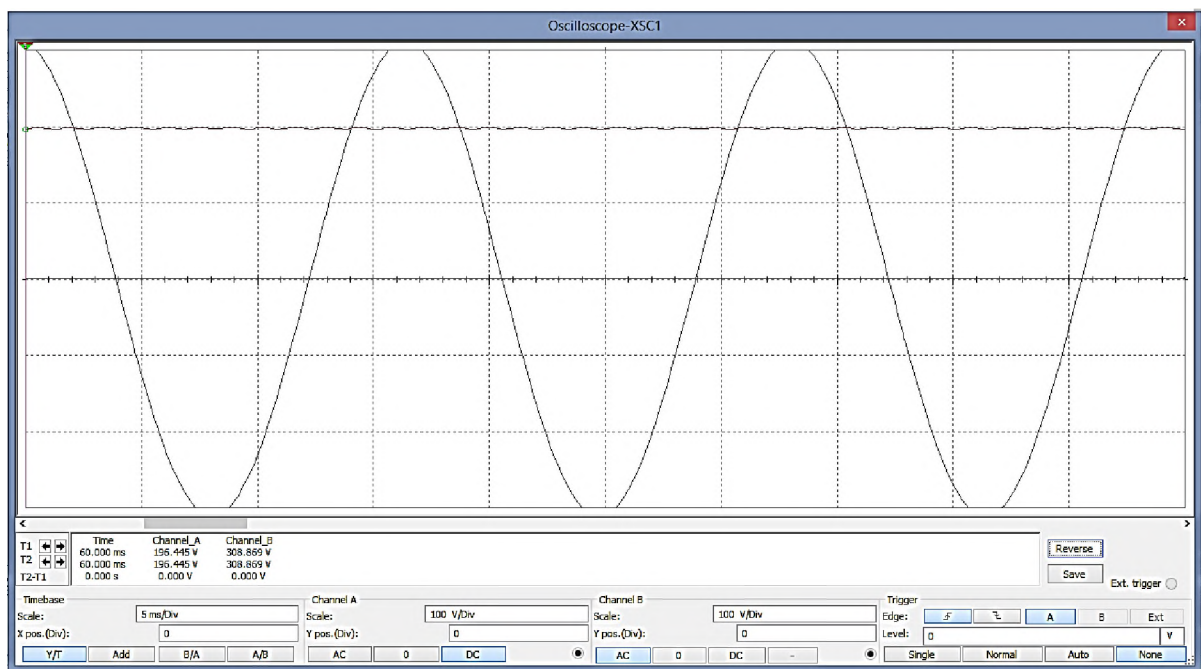


Рис. 3. Осциллограмма выпрямленного напряжения двенадцатипульсового выпрямителя в программе «NIMultisim»

В программе «NIMultisim» имеется возможность использовать трехфазные источники питания, задать число витков обмоток трансформатора, учесть их сопротивление и индуктивность, а также неидеальность сердечника (рис. 4).



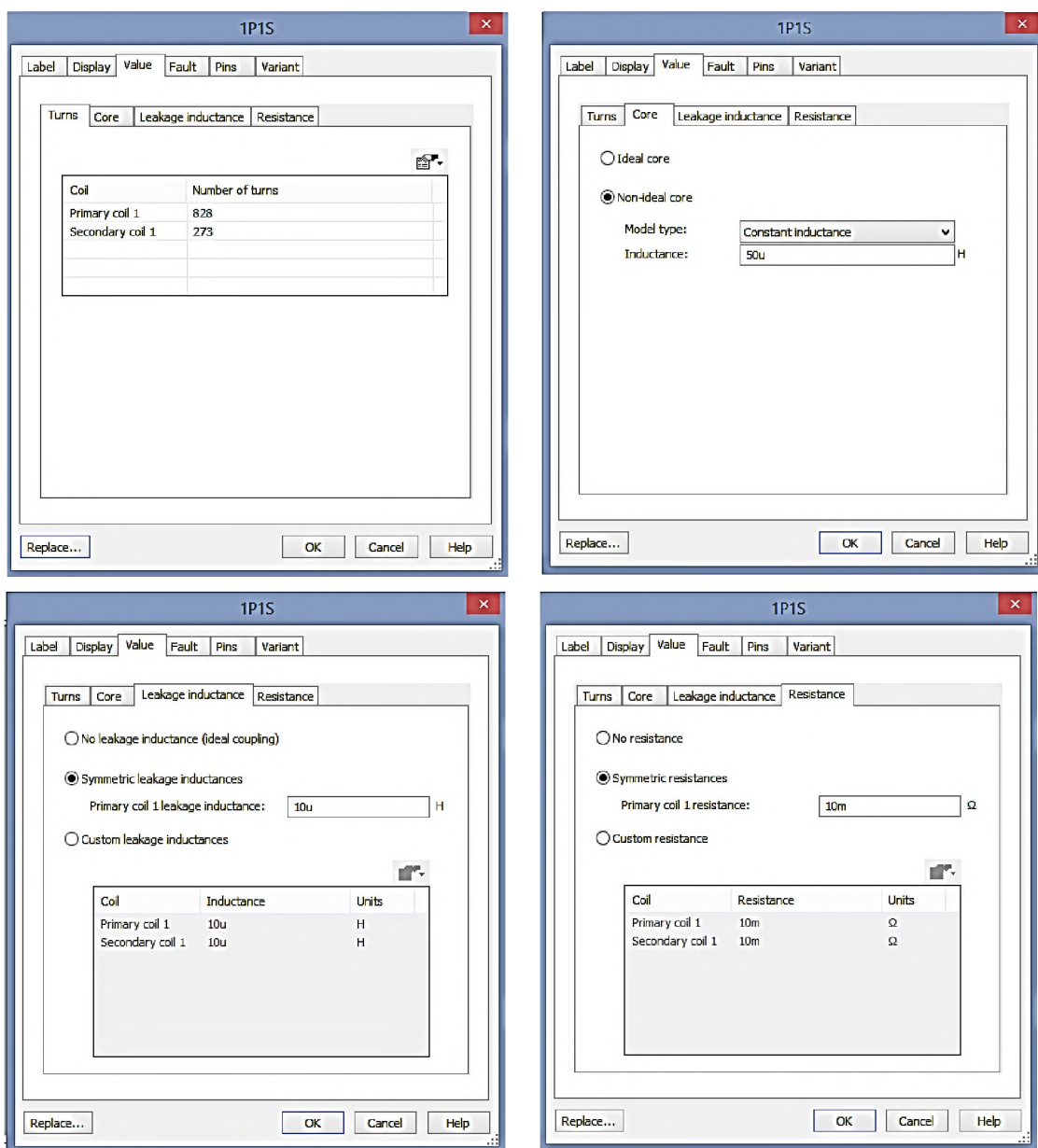


Рис. 4. Задание параметров трансформатора в программе «NIMultisim»

В дальнейшем планируется создать модель 24-пульсового выпрямителя, которая требует соединения вторичных обмоток трансформатора в «зигзаг».

### Список литературы

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1999. 464 с.
2. Еланский А.Ю., Лабунский Л.С. Особенности моделирования трехфазного выпрямителя в программе «Electronics Workbench» с реальными значениями параметров схем // Наука и образование транспорту: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Д.В. Железнов [и др.]. Самара, 2017. Т. 1. 268 с.

3. Преобразователь переменного напряжения в постоянное: пат. 2373628.Рос. Федерация № 2008138782/09; заявл. 29.09.08; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32.

4. Сидоров И.Н., Скорняков С.В. Трансформаторы бытовой радио-электронной аппаратуры: справочник. М.: Радио и связь, 1994. 320 с.

5. Титоренко К.В., Лабунский Л.С. Моделирование многопульсового трехфазного выпрямителя с включением обмоток трансформатора «в зиг-заг» в программе «Electronics Workbench» // Наука и образование транспорту: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Д.В. Железнов [и др.]. Самара, 2017. Т. 1. 268 с.

УДК 648.942.3

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Егор Юрьевич Долгушев

ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара  
leo.dod@yandex.ru

Рассматриваются особенности практического применения технологий искусственного интеллекта в системах релейной защиты (РЗА) электроэнергетических систем. Моделирование систем РЗА на элементах информационной сети, организованных по стандарту МЭК 61850, нацелено на широкое использование прикладных возможностей искусственного интеллекта для повышения уровня энергосбережения в энергосистеме.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, релейная защита, энергосбережение, интеллектуальная РЗА, токовая отсечка, структура сети.

## **THE USE OF INTELLIGENT RELAY PROTECTION OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY**

E.Yu. Dolgushev

Features of practical application of artificial intelligence technologies in relay protection systems of electric power systems are considered. Simulation of RPA systems on the elements of the information network, organized according to IEC 61850, is aimed at the wide use of applied capabilities of artificial intelligence in the power system.

**Key words:** artificial intelligence, energy saving, relay protection, instantaneous over-current, the structure of the network.

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) – важнейший тренд цифровой и информационной индустрии последних десятилетий. Технологии машинного обучения, глубинного анализа данных и интеллектуальные компьютерные системы постепенно проникают во все сферы человеческой деятельности.

В электроэнергетике искусственный интеллект пускают в ход, чтобы оценивать и прогнозировать техническое состояние оборудования. Например, с помощью ИИ можно выявить «аномальные события» в производственных процессах, незаметные для сотрудников, спрогнозировать параметры, которые сложно подсчитать в режиме реального времени: «индекс здоровья» (health index) установок, коэффициент полезного действия и прочее.

Проблема оптимального управления процессами в системах электро-снабжения существует с момента возникновения самой электроэнергетики. До настоящего времени решение этой проблемы затруднялось низким уровнем или отсутствием информационных сетей, развитых АСУ ТП, низким уровнем квалификации персонала, обслуживающего электросети. Системы электроснабжения до 35 кВ рассматриваются как вторичные по отношению к основной сети энергосистемы (110 кВ и выше), в результате, отсутствуют эффективные методы управления ими, а практические наработки энергосберегающих технологий фрагментарны.

Существующие системы электроснабжения проектировались в 60–80-е годы прошлого столетия и соответствовали требованиям того времени. Они строились по радиально–магистральному принципу и не были рассчитаны на применение источников распределенной генерации, возобновляемой энергии, элементов силовой электроники и др., им не характерны динамические нормальные и аварийные режимы функционирования, повышенные уровни и изменяющиеся направления токов коротких замыканий.

Развитие концепции интеллектуализации электроэнергетики предусматривает системный подход к управлению всеми видами доступных ресурсов, в том числе повышения уровня энергосбережения и энергоэффективности, взаимовыгодное участие энергопотребителей в решении разнообразных системных задач. Возникновение потребности в активных потребителях и оптимизации управления электропотреблением обуславливает необходимость создания и совершенствования методов и подходов взаимодействия потребителей с энергокомпаниями, определения класса активных потребителей, регулирования их нагрузки.

Новые технологии в электроэнергетике, практическая реализация цифровых подстанций с системами связи по стандарту МЭК 61850 открывают широкие возможности по созданию новых интеллектуальных систем управления электроснабжением с активными промышленными потребителями, позволяющими решать задачу энергосбережения на принципиально новом качественном уровне.

Любая энергосистема не является неделимым объектом – она состоит из частей. В общем случае, система электроснабжения (микрогрид) представляет собой совокупность некоторых «типовых» элементов (рис.1), включая перспективные силовые и управляющие элементы с еще неизвестными параметрами. Эта совокупность объединяется единым электрическим режимом, который реализуется силовой электрической сетью, состоящей из линий электропередач, подстанций с коммутационными аппаратами, силовыми трансформаторами, автоматическими устройствами, связью и т. д.

В настоящее время релейная защита систем электроснабжения, построенная на базе искусственного интеллекта, – это технология построения систем автоматизации и управления энергообъектами, основанная на стандартах IEC 61850 с использованием новейших устройств обработки и сбора информации, таких как цифровые трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), выносные устройства связи с объектом (УСО) и интеллектуальные электронные устройства.

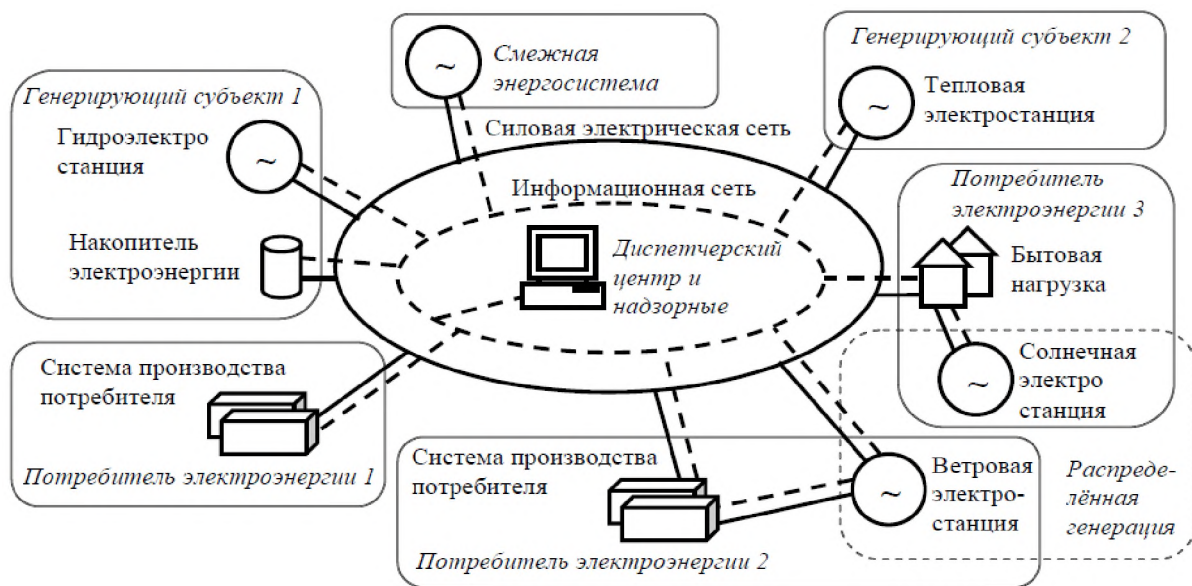


Рис. 1. Укрупненная структура системы электроснабжения

В этом случае релейная защита состоит из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, соединенного посредством протокола связи IEC 61850.

Релейная защита (РЗА) обеспечивает эффективное использование информации о процессах на подстанции, повышения согласованности действия различных видов оборудования:

- интеллектуальное первичное оборудование: электронные трансформаторы; интеллектуальный выключатель; онлайнный контроль;

- сетевое вторичное оборудование: сеть MMS уровня для управления системой GOOSE и SMV.

Стандарт IEC 61850 отличается от других стандартов тем, что в нем регулируются не только вопросы передачи информации между устройствами, но и вопросы оптимизации описания схем – подстанции, защиты, автоматики и измерений, конфигурации устройств. В данном стандарте предполагаются возможности использования новых цифровых измерительных устройств вместо традиционных аналоговых измерителей. Информационные технологии позволяют перейти от традиционных средств к автоматизированному проектированию систем электроснабжения, управляемых интегрированными системами обработки данных.

Система релейной защиты энергетического объекта, построенного по технологии искусственного интеллекта, делится на 3 уровня:

- уровень присоединения;
- полевой уровень (уровень процесса);
- станционный уровень.

Уровень присоединения состоит из следующих компонентов:

- устройства мониторинга и управления (контроллеры присоединения, многофункциональные измерительные приборы, счетчики АСКУЭ системы мониторинга трансформаторного оборудования);
- терминалы релейной защиты и локальной противоаварийной автоматики.

Полевой уровень (уровень процесса) включает в себя:

- датчики для сбора дискретной информации и передачи команд управления на коммутационные аппараты (micro RTU);
- датчики для сбора аналоговой информации (цифровые трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН)).

Станционный уровень состоит из следующих компонентов:

- серверы верхнего уровня (сервер базы данных, сервер SCADA, сервер телемеханики, сервер сбора и передачи технологической информации, концентратор данных);
- автоматизированные рабочие места (АРМ) персонала подстанций [1].

В настоящее время отечественная энергосистема только начинает активно использовать энергопроекты, содержащие ИИ в РЗА. Так, например, на данный момент планируется поставка некоторых элементов ИИ РЗА на подстанции Федеральной сетевой компании, причем применение технологий искусственного интеллекта на этих энергетических объектах

будет происходить совместно с созданием традиционных информационно-управляющих систем подстанций, что может создать некоторые сложности в оценке энергоэффективности при переходе ЕНЭС (Единая национальная электрическая сеть) на новые технологии в система РЗА.

При проектировании системы релейной защиты на базе ИИ уделяют особое внимание характеристикам объекта управления. В зависимости от типов основного силового оборудования и компоновки быть выбраны разные структуры построения вторичных информационных систем.

В настоящее время при автоматическом управлении электрическими сетями активно используются новые информационные технологии – интеллектуальные электронные устройства управления (ИЭУ) и элементы информационной сети, организованные по стандарту МЭК 61850 (рис. 2).

Новые тенденции развития электрической сети необходимы для достижения целевой функции управления энергосистемами – увеличения экономичности, надежности, безопасности электроснабжения за счет новых, более эффективных интеллектуальных методов обработки информации о характеристиках и режимах сети.

Принятие решения в каждом устройстве управления осуществляется на основе заранее заданного приоритета решаемых задач: например, ликвидация аварийного режима имеет наибольший приоритет, восстановление электроснабжения – меньший приоритет, обеспечение качества и экономичности – еще меньший приоритет и т. д.

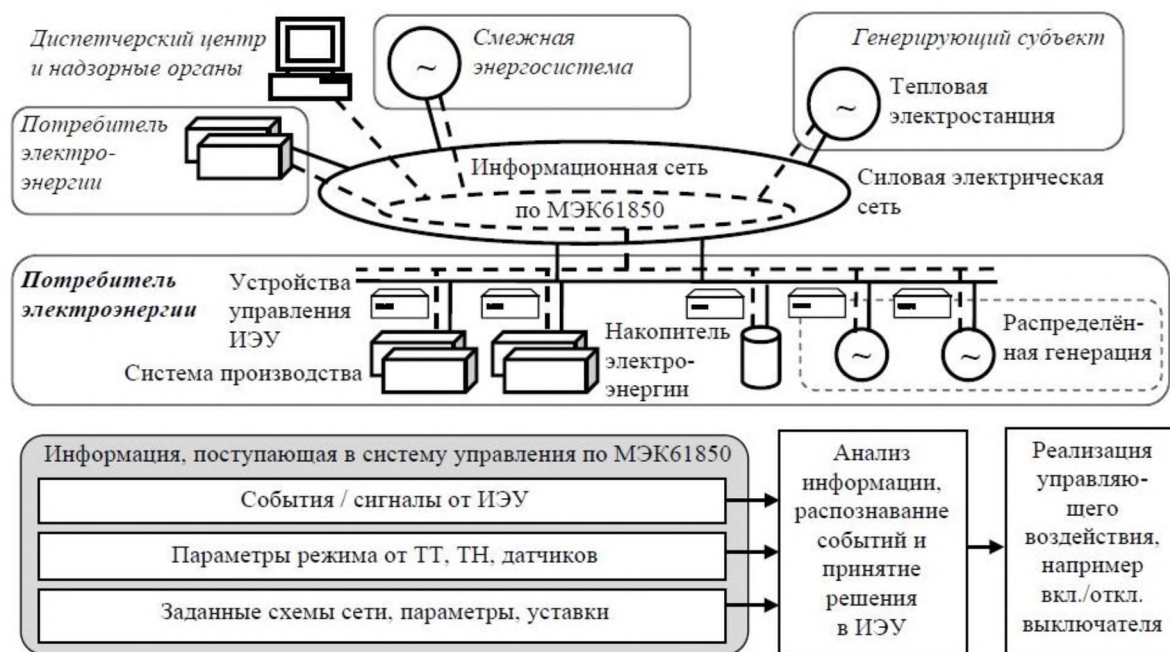


Рис. 2. Общая схема системы автоматического управления электрическими сетями

В настоящее время возможно построение адекватных математических моделей практически любых электроустановок и участков электрической сети [2]. Проведя необходимое количество имитационных экспериментов на данных моделях возможно получение требуемой статистики по энергоэффективности любых специфических электрических режимов.

Таким образом, методы управления режимами энергоэффективности электрической сети являются одним из ключевых элементов предлагаемой структуры РЗА на базе искусственного интеллекта. В связи с тем, что традиционные принципы релейной защиты и автоматики электроснабжения зачастую не могут обеспечить выдвигаемые к ним требования по чувствительности, развитие методов искусственного интеллекта и микропроцессорной элементной базы РЗА в электроэнергетических системах создает мощную перспективу для улучшения энергосбережения.

### Список литературы

1. Нудельман Г.С. Релейная защита следующего десятилетия // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 2. С. 92–98.
2. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей // Известия Академии наук РФ. 2015. №4. С. 28–37. (Сер. «Энергетика»).

УДК 621.316

## МУЛЬТИ-АГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Ксения Алексеевна Москалева<sup>1</sup>, Иван Николаевич Паскарь<sup>2</sup>

КузГТУ, г. Кемерово

<sup>1</sup>moskalevakseniya@mail.ru, <sup>2</sup>paskar-ivan@mail.ru

В настоящее время развитие электроэнергетики направлено в сторону интеллектуальных технологических решений. Одним из перспективных направлений является развитие мульти-агентных систем (МАС). На примере объектов энергосистемы Кемеровской области рассмотрена структура МАС, ее возможности и перспективы внедрения в систему электроснабжения.

**Ключевые слова:** мульти-агентные системы, агент, программный комплекс, электроснабжение, оптимизация СЭС, моделирование.

## MULTI-AGENT SYSTEMS IN POWER INDUSTRY

K.A. Moskaleva, I.N. Pascar

At present, the development of electric power industry is directed towards intelligent technological solutions. One of the promising directions is the development of multi-agent systems (MAS). On the example of the power system facilities of the Kemerovo Region, the structure of the MAS, its capabilities and prospects for implementation in the power supply system are considered.

**Keywords:** multi-agent systems, agent, software, power supply, SES optimization, modeling.



Последнее десятилетие вопросы организации грамотного и эффективного управления в электроэнергетике привлекают внимание многих исследователей. Вследствие часто меняющихся режимов работы электроэнергетических систем (ЭЭС), поломок, аварий необходимо быстрое реагирование на такие возмущения с последующим восстановлением работы системы.

Кроме того, наиболее сложной задачей в области системных исследований ЭЭС становится учет ряда неопределенностей и факторов, которые сложно отразить в традиционных математических моделях. Как следствие, наблюдается неоднозначность оценки рассматриваемой проблемы и верность принимаемых решений [1].

На сегодняшний день решение подобных вопросов ориентировано в сторону развития агентных систем, в основе которых лежит имитационное агентное моделирование поведения множества объектов, помещенных в определенную среду. Здесь сначала определяются параметры активных объектов (агентов), а затем – их поведение и состояние. Далее задаются связи между агентами с определением внешней среды, в которой они находятся, и запускается непосредственно моделирование. В итоге образуется совокупность из определённого множества агентов, которая формирует мульти-агентную систему (МАС).

В новых условиях развития электроэнергетического комплекса МАС обзореваются в двух направлениях: как научно исследовательская база, позволяющая смоделировать электроэнергетическую систему, направленную на решение множества задач, и как платформа для интеллектуальной организации системы управления. Тогда агент может выступать в роли не только некоторой модели, отражающей формализованное описание реальной системы, но и являться технологическим решением на базе искусственного интеллекта (ИИ) [2].

Реализации агентом конкретных действий путем восприятия внешних воздействий осуществляется с помощью специальных устройств – рецепторов. Исполнительным органом агента, с помощью которого возможно оказывать влияние на внешнюю среду, являются устройства – эффекторы. Кроме этого, агент включает в себя процессор – специальное устройство обработки информации, и память. Под памятью понимают способность агента хранить сведения о своем состоянии и состоянии среды [2].



Рассмотрим организацию управления объектами энергокомплекса Кузбасса с помощью мульти-агентного подхода. Для того, чтобы наглядно представить работу системы электроснабжения, была использована специальная программная платформа на основе агентно имитационного моделирования – AnyLogic.

Каждый элемент СЭС представляется в виде соответствующего агента. На рис. 1 изображена мульти-агентная схема части энергорайона Кузбасса, которая представлена совокупностью трех агентов: агент Кемеровской ГРЭС, осуществляющий генерацию электрической энергии, агент ЛЭП, который отражает передачу электроэнергии до конечного потребителя, и агент ПС Рудничная, которая является фактической нагрузкой.

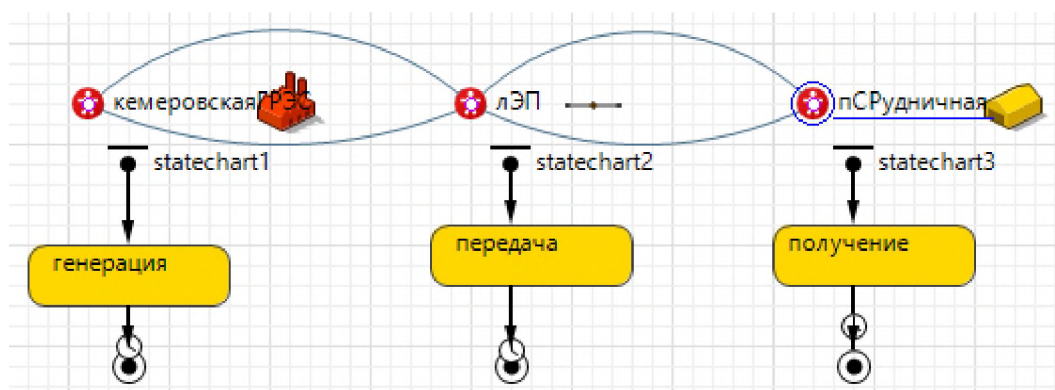


Рис. 1. Мульти-агентная схема участка энергорайона Кемеровской области

В соответствии с моделируемым объектом в каждый агент вносятся параметры его схемы замещения. Затем устанавливаются взаимосвязи между всеми агентами системы для дальнейшей организации их совместных действий. В первую очередь инициатива исходит от агента нагрузки ПС Рудничная. Он определяет количество необходимой ему электроэнергии и отправляет запрос агенту генерации через агент ЛЭП. Агент Кемеровская ГРЭС получает запрос. Проверяет наличие подключенных к его шинам других нагрузок и наличие свободного ресурса. Агент ЛЭП, в свою очередь, сверяет запрос от агента нагрузки со своими параметрами, определяющие пропускную возможность линии. Агент генерации сравнивает полученные данные с данными запроса. Затем при положительном результате отправляет положительный ответ на запрос агента ПС Рудничная.

Мульти-агентные системы могут быть использованы для эффективного решения широкого спектра проблем электроэнергетического комплекса. «Комплексная программа развития электрических сетей на территории Кемеровской области в части развития сетей 35–110 кВ на период 2019–2023 гг.» отражает факт недопустимого перегруза трансформаторов в период прохождения максимума нагрузки у 25 подстанций 35 кВ и выше,

выявлена высокая степень загрузки центров питания 110–220 кВ. Кроме того, в составе энергосистемы Кемеровской области преобладают электрические сети 110–220 кВ, пропускная способность которых ограничена электрооборудованием станций и подстанций энергосистемы.

Решение поставленных проблем можно наглядно реализовать с помощью мульти-агентного моделирования. С помощью программной модели возможно произвести анализ режимов работы систем электро-снабжения с учетом влияющих факторов и перспектив дальнейшего развития.

Для оптимизации работы энергосистемы Кузбасса был рассмотрен вариант внедрения в существующую энергосистему интеллектуального технологического решения, которое в программном комплексе представлено в виде совокупности агентов:

- агент диагностики производит непрерывный анализ работы агрегатов и координирует действия других агентов в случае выхода диагностируемых параметров за допустимые пределы;
- агент прогнозирования осуществляет прогноз потребления электроэнергии и потерь мощности;
- агент автонастройки формирует базу знаний о настройке АРВ и АРЧМ (рис. 2).

Количество агентов может варьироваться в зависимости от поставленных задач и способов их решения.

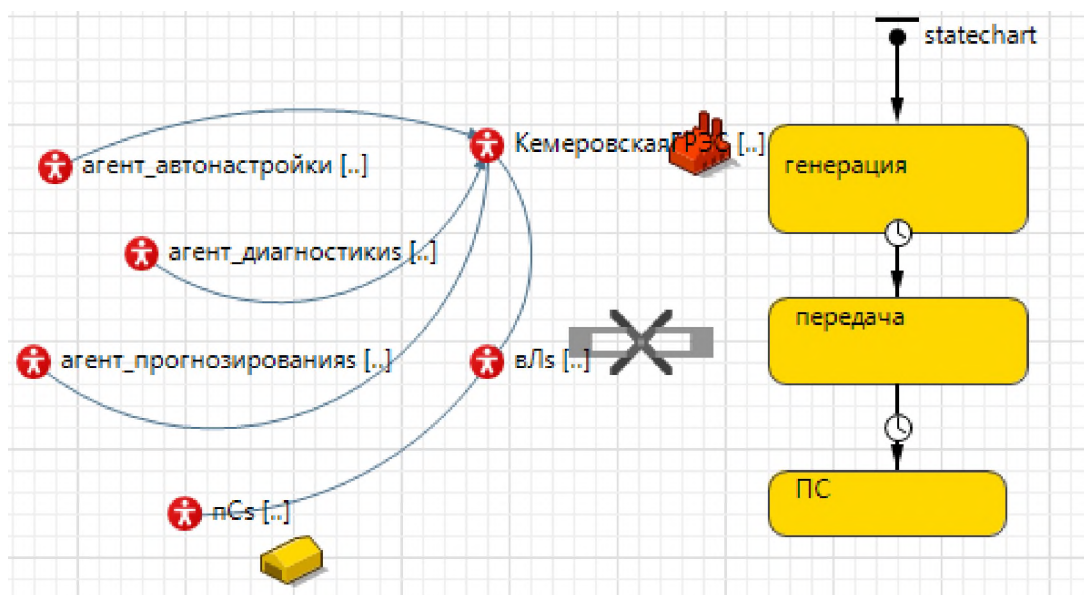


Рис. 2. Структура системы управления электроснабжением с внедрением элементов МАС

Агент диагностики посредством рецепторов измеряет параметры объектов энергосистемы, в конкретном случае, это может быть анализ выключателей, трансформаторов или же релейной защиты на Кемеровской ГРЭС. Агент диагностики на основе данных о нагрузках способен сформировать прогноз потребления на дальнейшую перспективу с учетом ресурсных возможностей объекта генерации. Также данный агент способен выявить особо загруженные участки системы и путем подачи сигнала организовать их разгрузку. Агент автонастройки фиксирует напряжение, частоту и поступающие сигналы от АРВ и АРЧМ для корректировки коэффициентов настройки в зависимости от режима работы системы. Все агенты связаны между собой с помощью каналов связи, благодаря чему осуществляется их непрерывное взаимодействие путем отправки сообщений.

Таким образом, благодаря координации действий абсолютно всех участников энергетического комплекса, осуществляется надежное и быстрое управление СЭС. На базе результатов моделирования, которые реализуются в программном комплексе AnyLogic, можно судить об эффективности внедрения в энергокомплекс технологически нового оборудования, надежного интеллектом.

### **Список литературы**

1. Елохин В.Р. Имитационное моделирование энергетических систем // Вестник ИргТУ, 2013. № 4. С. 145–150. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/imitatsionnoe-modelirovanie-energeticheskikh-sistem> (дата обращения: 02.12.18).
2. Москалева К.А. Мульти-агентные системы: новые возможности в электроэнергетике // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. 2018. № 7.
3. Дерюгин Д.Е. Применение мультиагентных технологий для управления группой роботизированных устройств // Выпускная квалификационная работа – 2017. URL: [http://se.math.spbu.ru/SE/diploma/2017/mfiit/Derjugin\\_Denis\\_Evgenyevich-text.pdf](http://se.math.spbu.ru/SE/diploma/2017/mfiit/Derjugin_Denis_Evgenyevich-text.pdf) (дата обращения: 03.12.18).

УДК 621.311

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ**

Мусса Гумерович Баширов<sup>1</sup>, Данис Гаязович Чурагулов<sup>2</sup>

Филиал ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате

<sup>1</sup>eapp@yandex.ru, <sup>2</sup>danis.ch.g@mail.ru

На предприятиях нефтегазового производства отказ машинных агрегатов может привести к созданию аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим и экологическим ущербом. В современных условиях задача обеспечения

промышленной безопасности на предприятиях отрасли требует использования интегральных критериев, позволяющих идентифицировать текущее техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс машинных агрегатов с электрическим приводом. Оценка технического состояния машинных агрегатов в настоящее время осуществляется с использованием целого комплекса диагностических параметров. Для создания современных интеллектуальных систем управления техническим состоянием, энергетической эффективностью и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов необходимы критерии, позволяющие интегрировано оценивать их текущее техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс.

**Ключевые слова:** машинные агрегаты, электрический привод, оценка технического состояния, высшие гармонические составляющие, интегральный критерий, интеллектуальная система управления.

## INTELLIGENT CONTROL SYSTEM TECHNICAL CONDITION AND ENERGY EFFICIENCY OF MACHINE UNITS WITH ELECTRIC DRIVE

M.G. Bashirov, D.G. Churagulov

At the enterprises of oil and gas production, the failure of machine units can lead to the creation of emergency situations accompanied by significant economic and environmental damage. In modern conditions the task of ensuring industrial safety at the enterprises require the use of integral criteria, which allows to identify the current technical state and to predict the remaining life of machine units c electric drive. Evaluation of the technical condition of machine units is currently carried out using a whole set of diagnostic parameters. In order to create modern intelligent control systems for technical condition, energy efficiency and safety of machine units operation, criteria are needed that allow integrated assessment of their current technical condition and predict the residual life.

**Keywords:** machine units, electric drive, technical condition assessment, higher harmonic components, integral criterion, intelligent control system.

Одним из основных элементов технологических установок нефтегазового производства являются машинные агрегаты, от технического состояния которых во многом зависят непрерывность, энергетическая эффективность и безопасность технологических процессов [1]. Оценка технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом в настоящее время осуществляется с использованием целого комплекса диагностических параметров. Для создания современных интеллектуальных систем управления техническим состоянием (ТС), энергетической эффективностью и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов (МА) необходимы критерии, позволяющие интегрировано оценивать их текущее техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс [2, 3].

Высокими темпами разрабатываются и внедряются автоматизированные системы управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (АСУ ТО и Р), предназначенные для повышения эффективности

диагностического и технического обслуживания и ремонта оборудования. Обязательным условием эффективного функционирования АСУ ТО и Р является обеспечение её взаимодействия с бухгалтерскими и складскими системами предприятия, системами снабжения и сбыта, системами управления персоналом, системами расчёта смет, с АСУ ТП и системами диагностики технического состояния оборудования.

Системы автоматической диагностики – это новое поколение систем непрерывной диагностики состояния машинных агрегатов, которые выявляют неисправности, её идентификацию, консультацию обслуживающего персонала по устранению неисправности автоматически при минимальном участии в процессе специалистов по диагностике. Все существующие на сегодняшний день системы автоматической диагностики машинных агрегатов основаны на автоматическом отслеживании изменения параметров вибраций, смещений, скорости, температуры отдельных элементов агрегата, а также параметров технологических процессов, в которых задействованы эти агрегаты [4].

Проведённые исследования показали эффективность и целесообразность использования в автоматических системах диагностики машинных агрегатов в качестве основных диагностических показателей параметров гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода. Информация о техническом состоянии машинных агрегатов из автоматической системы диагностики поступает в интеллектуальную систему управления техническим состоянием, энергетической эффективностью и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов [5].

Одной из причин, сдерживающих широкое применение автоматизированных систем диагностики машинных агрегатов, является необходимость создания обширной базы данных по характерным повреждениям машинных агрегатов, возникающих в процессе эксплуатации, а затем научить интеллектуальную систему распознавать эти дефекты. Причем надо знать значения диагностических параметров, соответствующие исходному, заведомо исправному состоянию агрегата, и значения этих параметров, соответствующие предельному состоянию агрегата, а также уметь оценивать текущее техническое состояние агрегата между этими двумя крайними значениями. Несколько ускорить процесс создания базы характерных дефектов машинных агрегатов и ускорить процесс обучения системы искусственного интеллекта, построенной на основе искусственных

нейронных сетей, распознаванию этих дефектов, позволяет проведение экспериментальных исследований с созданием различных уровней поврежденности основных элементов машинных агрегатов.

Решение проблемы в данном случае является разработка моделей машинных агрегатов с учетом их конструктивных особенностей на основании паспортных и каталожных данных с использованием стандартных пакетов программ для компьютерного моделирования.

Двигатель электропривода машинного агрегата можно рассматривать как высокочувствительный электромагнитный активный датчик, преобразующий все изменения технического состояния как самого электродвигателя, так и всех остальных элементов машинного агрегата в параметры генерируемых высших гармонических составляющих фазных токов и напряжений. Поэтому проводят моделирование самого электродвигателя, а затем искажения электромагнитного поля в зазоре электродвигателя при различных влияющих факторах, которые являются причиной генерирования высших гармонических составляющих токов и напряжений.

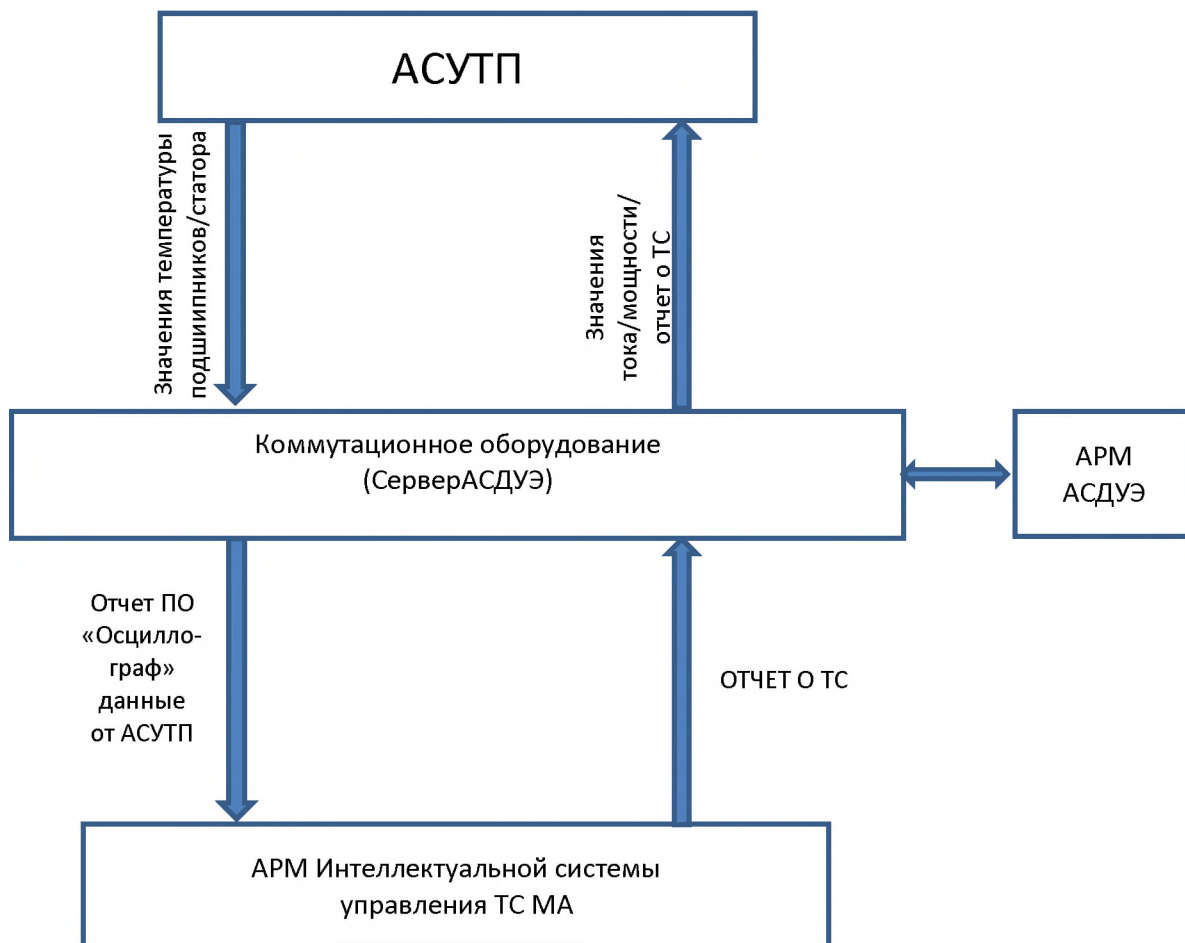
Моделирование электромагнитного поля двигателя электропривода машинного агрегата в программе ANSYS Maxwell производится на основе модели полученной в программе ANSYS RMxprt. Для этого необходимо использовать встроенную функцию CreateMaxwellDesign в ANSYS RMxprt.

В ANSYS Maxwell помимо магнитного векторного потенциала есть возможность отображения напряженности магнитного поля, вектора магнитной индукции и плотности тока, а также вывода различных графиков, среди которых индуцированные в обмотках напряжение и ток, различные виды потерь, график скорости и т. д.

Функциональная схема интеллектуальной системы управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов на основе использования спектрального метода диагностики представлена на рисунке.

Компьютер интеллектуальной системы оценки ТС МА, получив с сервера АСДУЭ пакеты с информацией, рассчитывает средние значения результатов параллельных измерений, отфильтровывает помехи, поступающие из сети, определяет уровень поврежденности электрической машины по значениям диагностических параметров. Интегральный критерий формируется искусственной нейронной сетью с использованием

программного продукта «Оценка технического состояния электрооборудования на основе интегральных параметров» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615158) [6].



Функциональная схема интеллектуальной системы управления техническим состоянием машинных агрегатов на основе использования спектрального метода диагностики

Алгоритм идентификации технического состояния машинного агрегата основан на использовании значения интегрального критерия I. Работа алгоритма следующая: исследуемые токи, напряжения и температура элементов оборудования с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровой код. Последовательность цифровых кодов, характеризующих сигнал за определенный период времени, поступает в центральный компьютер и обрабатывается. Блок дискретного преобразования Фурье раскладывает исследуемый сигнал в ряд Фурье. Определяются действующие значения коэффициентов гармонических составляющих тока  $K_{In}$  и напряжения  $K_{Un}$ , угол между данными величинами  $\varphi_{ui}(n)$ , а также температурный коэффициент. Для фильтрации гармонических

составляющих фазных токов и напряжений, поступающих из сети, применяют углы сдвига по фазе  $\varphi_{ui}(n)$ : если угол сдвига меньше  $+90^\circ$  или больше  $-90^\circ$ , то данная гармоническая составляющая поступает из сети и из анализа исключается. Далее происходит обучение нейронной сети. Определяются  $K_{In}$ ,  $K_{Un}$ ,  $\varphi_{ui}(n)$ ,  $T_{подш}$  и  $T_{изол}$  исследуемого агрегата, по значениям которых искусственная нейронная сеть формирует соответствующий числовой бинарный код. Бинарный код поступает в «Словарь», где сопоставляется с кодами известных дефектов. Если полученному коду соответствует известный дефект, то цикл идентификации кода режима работы и поврежденности элементов машинного агрегата  $D_m$  заканчивается, если не соответствует, то пользователю предлагается ввести в режиме «ручного ввода дефекта» наименование возможного повреждения. Далее данные поступают в искусственную нейронную сеть, которая определяет уровень поврежденности машинного агрегата в целом – значение интегрального диагностического параметра поврежденности  $D_\Sigma$ . Интегральный критерий формируется с помощью диагностических параметров  $D_\Sigma$ , сроков и условий эксплуатации, факторов пожаро- и взрывоопасности производства с соответствующими весовыми коэффициентами.

После обработки данных заключение о ТС конкретного машинного агрегата передаются на сервер SCADA и далее в АСУТП. Процедуру оценки ТС возможно инициировать вручную и автоматически с заданным интервалом времени.

Основное достоинство интеллектуальной системы управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов с электрическим приводом – осуществление удалённого контроля и диагностирование на работающем оборудовании. Определение дефектов на работающем машинном агрегате в начальный период времени их развития не только предотвращает неожиданную остановку технологического процесса в результате аварии, но и существенно увеличивает срок его эксплуатации и уменьшает затраты на ремонт оборудования [7].

### Список литературы

1.Баширов М.Г., Прахов И.В. Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. № 3. С. 7–14.



2. Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2011. 165 с.

3. Миронова И.С. Разработка интегральных критериев и системы управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2013. 124 с.

4. Интеграция интеллектуальной системы диагностики машинных агрегатов в Scada-систему предприятия / Гумеров И.Ф. [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 10. С. 49–53.

5. Разработка программно–аппаратного комплекса для оценки технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом / Самородов А.В. [и др.] // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 10–20.

6. Прахов И.В., Баширов М.Г., Самородов А.В. Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. № 2. С. 14–17.

7. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом: пат. 2431152 Рос. Федерация №2009143292/28; заявл. 23.11.09; опубл. 10.10.11, Бюл. № 28.

УДК 681.51

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АО «ТГК-11» ОМСКАЯ ТЭЦ**

Ирина Александровна Семина<sup>1</sup>, Индира Сериковна Кожмендина<sup>2</sup>,  
Дмитрий Ильенко<sup>3</sup>

ОмГТУ, г. Омск

<sup>1</sup>semina\_ia@mail.ru, <sup>2</sup>indira2405@mail.ru, <sup>3</sup>dima.ilenko.95@mail.ru

В настоящей статье рассматривается техническое решение по созданию автоматизированной системы мониторинга и технического диагностирования (АСМД) двух силовых трансформаторов АО «ТГК-11» Омская ТЭЦ.

**Ключевые слова:** автоматизированная система мониторинга, оптимизация режимов эксплуатации электрооборудования, ретроспективный анализ режимов работы электрооборудования.

# AUTOMATED MONITOR SYSTEMS AND SYSTEMS OF TECHNICALDIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS OF THE JSC “TGC-11” OMSK THERMOELECTRIC PLANT

I.A. Semina, I.S. Kozhmendina, D.P. Ilyenko

In this particular article the engineering solution of creation of an automated monitor system and technical diagnosis (AMSD) of two power transformers of the JSC “TGC-11” Omsk thermoelectric plant is reviewed.

**Keywords:** automated monitor system, optimization of electrical equipment’s operating modes; retrospective analysis of electrical equipment’s operating modes.

Предлагаемые аппаратные и программные средства АСМД базируются на современной методологии диагностирования высоковольтного оборудования, опыте контроля технического состояния электроэнергетического оборудования под рабочим напряжением (в режиме мониторинга, «on-line»). Работы проводятся с целью обеспечения предупреждения появления дефектов и определения степени их опасности в силовом высоковольтном оборудовании и, соответственно, повышения его эксплуатационной надежности. Архитектура АСМД представляет собой трехуровневую автоматизированную систему с распределенными функциями измерения, контроля, анализа и регистрации.

Внутрисистемные коммуникации осуществляются на базе технологии Ethernet/TCP/IP с применением стандартных протоколов обмена данными Modbus/TCP и МЭК 60870-5-104. Верхний уровень образует сервер системы мониторинга. Связь сервера с оборудованием нижнего и верхнего уровня, а также коммуникация со смежными системами (АСУТП) организована через промышленный сетевой коммутатор. Оборудование верхнего уровня располагается в шкафу АСМД уличного исполнения у контролируемого объекта. Устройства верхнего уровня обеспечивают:

- обработку и анализ сигналов с приборов среднего и нижнего уровня;
- определение технического состояния объектов диагностирования;
- расчет степени опасности дефекта;
- расчет остаточного ресурса;
- передача результатов обработки на АРМ инженера;
- ведение журнала событий, контроль работоспособности устройств среднего и нижнего уровня;
- предоставление регламентированного доступа к данным и управлению [1].



Обобщенная структурная схема АСМД трансформаторов представлена на рис. 1. Используемые программно–аппаратные решения позволяют проводить модернизацию или расширение системы без внесения существенных изменений в уже установленные и эксплуатируемые модули и подсистемы. Средний уровень образуют устройства обработки сигналов с датчиков нижнего уровня, концентрации и организации межуровневых коммуникаций. Устройства среднего уровня обеспечивают:

- передачу информации от устройств нижнего уровня на верхний уровень АСМД;
- передачу информации от верхнего уровня на устройства нижнего уровня;
- интеграцию смежных автоматизированных систем (РЗА, РАС, АСУТП) с АСМД; передачу информации в автоматизированные системы вышестоящих организаций.

К оборудованию среднего уровня относятся:

- модуль ввода сигналов, для сбора и передачи сигналов с датчиков встроенных систем контроля трансформаторов (датчики температуры, датчики состояния системы охлаждения). Передача сигнала осуществляется по медным кабелям КВВГЭнг от шкафа ШАОТ;
- конвертер интерфейса RS-485 в Ethernet, для возможности передачи сигнала от датчиков контроля газовлагодержания и датчиков встроенных систем контроля трансформатора. Передача сигнала осуществляется по кабелю промышленного интерфейса RS-485;
- измеритель ЧР, для сбора и передачи сигналов с датчиков ЧР.

Сбор сигналов с датчиков ЧР осуществляется по коаксиальному кабелю:

- устройство контроля изоляции вводов, для измерения сигналов тока проводимости вводов;
- коммуникации между оборудованием среднего уровня и связь с оборудованием верхнего уровня реализовано через промышленный коммутатор. Данные между оборудованием среднего уровня передаются по кабелю Ethernet/UTP. В качестве среды передачи данных на верхний уровень системы применяется одномодовое или многомодовое оптоволокно.

Нижний уровень (уровень датчиков) образуют датчики ПИН ввода, датчики газо- и влагосодержания, датчики температуры, датчики уровня масла. Устройства нижнего уровня обеспечивают:

- измерение значений аналоговых и дискретных значений диагностических параметров;
- нормализацию и масштабирование измеряемых и расчетных величин;
- присвоение всем измерениям и зарегистрированным событиям меток времени.

В рамках создания АСМД на трансформатор устанавливается датчики на измерительный вывод высоковольтного ввода и хроматограф. Наряду с устанавливаемыми датчиками используются данные с установленных на заводе систем контроля диагностируемых параметров.

Полный перечень диагностических параметров, контролируемых системой мониторинга представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень диагностических параметров, контролируемых системой мониторинга силовых трансформаторов

| Параметр, событие                                                                | Датчик/источник информации                                                            | Тип сигнала   |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Аналоговые параметры                                                             |                                                                                       |               |
| Напряжение фазное:<br>ВН<br>НН                                                   | АСУТП                                                                                 | МЭК 870–5–104 |
| Ток фазный:<br>ВН<br>НН                                                          | АСУТП                                                                                 | МЭК 870–5–104 |
| Содержание в масле:<br>водорода H <sub>2</sub><br>горючих газов<br>влаги в масле | Прибор контроля<br>газосодержания масла<br>Прибор контроля<br>влажностерождения масла | Modbus        |
| Температура:<br>верхних слоев масла<br>внешней среды                             | Датчик температуры                                                                    | 4...20 мА     |
| Контроль характеристик<br>и локации ЧР                                           | Датчики ЧР                                                                            | Modbus        |
| Ток электродвигателей:<br>вентиляторов<br>маслонасосов                           | ТТ                                                                                    | 0...1 А       |
| Релейные параметры                                                               |                                                                                       |               |
| Двигатели вентиляторов:<br>включены<br>аварийно отключены                        | Шкаф СО                                                                               | Сухой контакт |

| Параметр, событие                                                                                   | Датчик/источник информации              | Тип сигнала |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|
| Расчетные параметры                                                                                 |                                         |             |
| Коэффициент нагрузки                                                                                | Математическая модель № 2<br>(табл. 2)  | —           |
| Активные, реактивные, полные мощности, коэффициенты мощности $\cos\varphi$                          |                                         | —           |
| Температура наиболее нагретой точки обмотки                                                         | Математическая модель № 3<br>(табл. 2)  |             |
| Отработанное время:<br>физически<br>календарно                                                      | Математическая модель № 5<br>(табл. 2)  | —           |
| Относительная скорость термического износа изоляции                                                 |                                         | —           |
| Относительный износ изоляции за календарно отработанное время                                       |                                         | —           |
| Относительное влагосодержание масла                                                                 | Математическая модель № 4<br>(табл. 2)  | —           |
| Влагосодержание твердой изоляции                                                                    |                                         | —           |
| Температура образования пузырьков                                                                   |                                         | —           |
| Количество повышений напряжения за текущий год                                                      | Математическая модель № 1<br>(табл. 2)  |             |
| Отработанные моточасы вентиляторов                                                                  | Математическая модель № 6<br>(табл. 2)  |             |
| Количество пусков вентиляторов                                                                      |                                         |             |
| Характеристики УР (кажущийся заряд ЧР, ток, мощность ЧР, количество источников ЧР, тип дефектов ЧР) | Математическая модель № 10<br>(табл. 2) |             |
| Нагрузочная способность трансформатора                                                              | Математическая модель № 11<br>(табл. 2) |             |
| Время достижения предельных параметров при текущей нагрузке и схеме работы системы охлаждения       | Математическая модель № 11<br>(табл. 2) |             |
| Комплексная оценка состояния оборудования в «текущий» момент эксплуатации                           | Математическая модель № 12<br>(табл. 2) |             |

Используя измеренные диагностические параметры и математические модели оценки состояния, можно с высокой точностью определить состояние диагностируемого объекта [2]. Перечень математических моделей, применяемых в системе мониторинга, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень математических моделей, применяемых в системе мониторинга

| № п/п | Модель                                                   | Описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Временные превышения напряжения на стороне ВН            | Анализ и регистрация в соответствии с требованиями ГОСТ 1516.3-96                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2     | Мощность контролируемого оборудования                    | Постоянный расчет активной и реактивной мощности, $\cos\varphi$ по сторонам контролируемого оборудования объекта                                                                                                                                                                                                        |
| 3     | Температура наиболее нагретой точки обмотки              | Постоянный расчет температуры наиболее                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 4     | Содержание влаги в изоляции. Температура пузырьков пара  | Преобразование данных относительного влагосодержания масла в абсолютное. Расчет влагосодержания твердой изоляции в местах перегрева. Определение температуры закипания                                                                                                                                                  |
| 5     | Старение изоляции                                        | Расчет старения изоляции по температуре наиболее нагретой точки обмотки и расчетному влагосодержанию твердой изоляции. Прогноз старения и общего износа. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91), МЭК 60076-7                                                                                                                        |
| 6     | Состояние и эффективность системы охлаждения             | Расчет температуры верхних слоев масла по МЭК 60076-7 (ГОСТ 14209-97) и сравнение ее с фактической. Непрерывный контроль режима работы системы охлаждения (уровней ЛАВИН охлаждения), электродвигателей маслонасосов и вентиляторов                                                                                     |
| 7     | Оценка состояния основной изоляции высоковольтных вводов | Расчет параметров основной изоляции высоковольтных вводов (тангенс угла диэлектрических потерь, ёмкость и их изменения)                                                                                                                                                                                                 |
| 8     | Внутренние потери в трансформаторе                       | Расчет внутренних потерь активной части трансформатора (в том числе $P_{х.х}$ и $P_{к.з}$ ).                                                                                                                                                                                                                            |
| 9     | Характеристики ЧР                                        | ЧР Расчет кажущегося заряда ЧР. Построение амплитудно-фазных, амплитудно-частотных и частотно-временных диаграмм с определением вероятного типа дефектов и количества источников ЧР                                                                                                                                     |
| 10    | Нагрузочная способность трансформатора                   | Расчет нагрузочной способности трансформатора по ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91), МЭК 60076-7, МЭК 60076-2 в том числе выдача времени возможной работы до достижения предельных параметров при текущей нагрузке и схеме работы системы охлаждения. Допустимые величины и время перегрузки без ущерба для общего срока службы |

| №<br>п/п | Модель                                                                    | Описание                                                                                                                                                                                                          |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11       | Комплексная оценка состояния оборудования в «текущий» момент эксплуатации | Комплексная оценка технического состояния силового оборудования на «текущий» момент эксплуатации. Рекомендации по стратегии эксплуатации контролируемого оборудования с учетом требований СТО 34.01-23.1-001-2017 |

### Список литературы

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
2. Вдовико В.П. Методология диагностирования высоковольтного электрооборудования. Новосибирск: Наука, 2011. 118 с.

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОВМЕСТНО С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Инсаф Зуфарович Гараев<sup>1</sup>, Вилия Равильевна Иванова<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>insaf190396@mail.ru, <sup>2</sup>vr-10@mail.ru

Развитие современного регулируемого электропривода связано с распространением систем с управляемыми статическими полупроводниковыми преобразователями энергии. С освоением промышленностью выпуска мощных силовых транзисторов и современной микропроцессорной техники создаются условия для разработки преобразователя частоты с высокими технико-экономическими показателями. Частотное регулирование угловой скорости электропривода переменного тока с двигателями с короткозамкнутым ротором находят широкое применение в компрессорных установках.

**Ключевые слова:** частотный преобразователь, асинхронный электродвигатель, двигатель постоянного тока, частота, напряжение.

## RESEARCH OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH A FREQUENCY CONVERTER PERFORMANCE

I.Z. Garaev, V.R. Ivanova

The development of modern regulated electric drive is associated with the spread of systems with controlled static semiconductor energy converters. With the development of the industry production of powerful power transistors and modern microprocessor technology, conditions for the development of a frequency Converter with high technical and economic indicators are created. Frequency control of the angular velocity of the AC drive with motors with squirrel-cage rotor are widely used in compressor installations.

**Keywords:** frequency Converter, asynchronous electric motor, constant current motor, frequency, voltage.



Частотный преобразователь в комплекте с асинхронным электродвигателем пришел на замену электроприводу постоянного тока [1]. Асинхронные электродвигатели превосходят электродвигатели постоянного тока по многим параметрам: простота устройства и надежность ввиду отсутствия подвижных контактов. По сравнению с двигателями постоянного тока они имеют меньшие габариты, массу и стоимость, а коэффициент полезного действия выше в два-три раза. Технология изготовления асинхронных электродвигателей довольно проста.

Главным недостатком при использовании асинхронных электродвигателей является недостаточный диапазон и качество регулирования их скорости методами изменения питающего напряжения или введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток.

У электродвигателя же постоянного тока регулирование скорости осуществляется значительно проще. Но стоимость двигателя велика, а надежность низкая. При работе щетки начинают искриться, и их поверхность изнашивается, а со временем начинает изнашиваться и коллектор. Его использование во взрывоопасной среде, а также при повышенной запыленности не допустимо.

Основной схемой подключения асинхронного двигателя является схема «звезда–треугольник», но она не регулирует скорость, а только уменьшает нагрузку при старте, за счет уменьшения напряжения на концах обмоток.

Управление асинхронным электродвигателем за счет изменения частоты питающего напряжения до недавнего времени представляло собой большую проблему, хотя начало разработок частотного регулирования было положено еще в 30-х годах прошлого века. В то время развитие технологии частотного управления не могло интенсивно развиваться из-за высокой стоимостью комплектующих деталей преобразователя частоты. С появлением на рынке силовых схем и модулей на IGBT-транзисторах, а также с разработкой высокопроизводительных микропроцессорных систем управления появилась возможность для создания современных преобразователей частоты за разумные деньги [2, 3].

Регулировать частоту вращения установок можно при помощи различных устройств, таких как:

- шестеренчатые редукторы;
- муфты с гидравлической подачей;
- введение в обмотку статора или на ротор дополнительного сопротивления;
- электромеханическими частотными преобразователями;
- статическими частотными преобразователями.

При регулировании скорости первые четыре устройства не выдают достаточно высокого качества, неэкономичны, а затраты при монтаже и эксплуатации достаточно велики.

На сегодняшнее время статические преобразователи частоты выделяются при прочих как самые совершенные устройства управления скоростью асинхронного двигателя.

В соответствии с методом частотного регулирования:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p},$$

при постоянном количестве пар полюсов  $p$  можно менять угловую скорость магнитного поля статора  $\omega_0$ , изменив частоту питающего напряжения  $f_1$ .

Потери мощности невелики, так как при регулировании скоростных характеристик увеличения скольжения асинхронного двигателя не происходит.

Такой метод позволяет в широком диапазоне осуществлять плавную регулировку скорости, а также сохранять жесткость механических характеристик.

Для того, чтобы коэффициенты мощности, полезного действия и перегрузочной способности были максимально высоки, требуется подводимое напряжение изменять одновременно с частотой.

Можно выделить три закономерности изменения напряжения при постоянном моменте нагрузки:

- если момент нагрузки не изменяется с течением времени напряжение на статоре должно регулироваться прямо пропорционально частоте, тогда:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const};$$

- для момента нагрузки, характерного для вентиляторов, напряжение на статоре должно изменяться прямо пропорционально квадрату частоты:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const};$$

- при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, что характерно для обрабатывающих станков, напряжение на статоре прямо пропорционально квадратному корню из частоты:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const.}$$

Следовательно, для того, чтобы регулирование частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя осуществлялось плавно и бесступенчато, должны одновременно регулироваться частота и напряжение на питание асинхронного двигателя.

### Список литературы

1. Кравчик А.Э., Шлаф Н.Н., Афонин В.И. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат, 2002. 504 с.
2. Зубков А.А., Масандилов Л.Б. Частотный преобразователь для асинхронного электродвигателя. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 15 с.
3. Иванова В.Р., Фетисов Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. № 9-10. С. 165–169.

УДК 621.3

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Евгений Васильевич Калентионук<sup>1</sup>, Станислав Иосифович Богуславский<sup>2</sup>,  
Сергей Михайлович Романович<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>БНТУ, г. Минск

<sup>1</sup>ekol5@tut.by, <sup>2</sup>stasb.minsk@gmail.com, <sup>3</sup>s.m.ramamovich@gmail.com

Предложен рациональный путь автоматизации распределительных электрических сетей путем применения различных технических средств: выключателей нагрузки, реклоузеров и указателей поврежденного направления, устанавливаемых в трансформаторных подстанциях и на линиях электропередач.

**Ключевые слова:** автоматизация, электрическая сеть, оборудование, инвестиции, критерии, эффективность.

## RATIONAL APPROACH TO AUTOMATION OF DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORKS

Y.V. Kalentionok, S.I. Bahuslauski, S.M. Ramanovich

Proposed a rational way of automating distributed electrical networks through the using of various technical equipment: load break switches, reclosers and fault passage indicators, installed at transformer substations and on power lines.

**Keywords:** automation, electrical network, equipment, investments, criteria, efficiency.

Современные воздушные распределительные электрические сети характеризуются большой протяженностью и разветвленностью, многообразием применяемого оборудования. При этом общая протяженность отдельных линий достигает до 50 км с большим числом ответвлений. В качестве коммутационных аппаратов применяются, в основном, выключатели нагрузки и разъединители с ручным управлением. В этом случае любое повреждение на линии вызывает отключение и прекращение электроснабжения потребителей, подключенных к ней. Поскольку процесс поиска и локализации повреждения выполняется оперативными выездными бригадами путем осмотра и оперативных переключений в поврежденной линии, то длительность прекращения электроснабжения потребителей составляет от нескольких часов до суток. Одним из путей минимизации времени отключения потребителей, особенно электроприемников I и II категорий, и затрат энергоснабжающих организаций на поиск мест повреждений и обеспечения нормируемого уровня надежности является автоматизация распределительных электрических сетей путем применения автоматически управляемых коммутационных аппаратов. В качестве таковых могут использоваться выключатели, реклоузеры, а также выключатели нагрузки, интеллектуальные разъединители или отделители, имеющие автоматику, действующую на их отключения в бестоковую паузу.

Автоматизация распределительных электрических сетей позволяет:

- повысить надежность электроснабжения и уменьшить недоотпуск электроэнергии потребителям, т.к. возникновение повреждения на секционированном участке линии не приводит к отключению всех потребителей, получающих питание от данной линии электропередачи;
- локализовать участки линии с повреждениями;
- повысить уровень электробезопасности в распределительных сетях за счет сокращения времени работы линии в режиме с однофазными замыканиями на землю.

При этом необходимо четко понимать, что автоматизация требует затрат (инвестиций). Энергоснабжающая организация (компания) стремится к снижению затрат, связанных с обеспечением необходимого уровня надежности. Потребители электроэнергии, в свою очередь, стремятся к уменьшению ущерба и, следовательно, заинтересованы в высоком уровне надежности электроснабжения, зависящем от затрат на автоматически управляемые коммутационные устройства. Для разрешения этого объективно существующего противоречия между поставщиками и потребителями

электроэнергии при оценке инвестиционного проекта по автоматизации могут быть использованы критерии общественной (социально-экономической) эффективности, отражающими интерес всех субъектов хозяйствования (электрических сетей и потребителей электроэнергии). В качестве таких критериев возможно использование минимума приведенных затрат, чистого дисконтированного дохода, срока окупаемости, учитывающих как затраты электрических сетей на установку автоматически управляемых коммутационных устройств, так и эффект получаемый потребителями от осуществления автоматизации.

Первый реализованный проект комплексной автоматизации в Белорусской энергосистеме реализован в Бобруйском сельском районе электрических сетей в распределительной сети номинальным напряжением 10 кВ [2]. В систему автоматизации заложены технические принципы: минимизация времени отключения потребителей; применение однотипных модулей и программного обеспечения; наглядность отображения и удобство интерфейса; автоматическое формирование отчетов. Основным элементом управления конфигурацией сети принят реклоузер производства «Таврида Электрик» в количестве 229 штук при протяженности сети напряжением 10 кВ 833,4 км.

Таким образом, автоматическое секционирование линий путем дополнительной установки реклоузера выполнено через 3–4 км. Это позволяет довольно успешно локализовать участки линии с повреждениями и уменьшить недоотпуск электроэнергии потребителям. Однако данная система автоматизации весьма дорогостоящая, т.к. стоимость только одного реклоузера без строительно-монтажных и наладочных работ составляет порядка 10–15 тыс. USD.

В связи с введением нормативного документа по автоматизации распределительных электрических сетей [3], устанавливающих общие требования к компонентам комплекса средств автоматизированной системы, обосновать применение такого большого количества реклоузеров, не всегда удается. Это, прежде всего, связано с малой загрузкой сельских распределительных сетей и требованиями [3]:

- пункты секционирования и/или резервирования рекомендуется совмещать с РП 10(6) кВ, ТП 10(6) кВ. При технико-экономическом обосновании допускается применять реклоузеры;
- количество и места размещения секционирующих коммутационных аппаратов должны быть определены на основании технико-экономического обоснования.

Технико-экономическая оценка эффективности установки различных технических средств (устройств) для автоматизации распределительных электрических сетей может быть выполнена путем расчета чистого дисконтированного дохода (ЧДД) [4]. При этом капитальные затраты (инвестиции), необходимые для автоматизации распределительных электрических сетей, как правило, зависят от типа и количества средств автоматизации: реклоузера (РВ); выключателя нагрузки с дистанционным управлением внутренней установки (ВНУ); выключателя нагрузки с дистанционным управлением наружной установки (ВН-Н); камеры сборной одностороннего обслуживания (КСО), оснащенной ВНУ; указатели поврежденного направления в ТП (УПН-ТП); указатели поврежденного направления на ВЛ (УПН-ВЛ).

Выполненные с помощью специально составленной на кафедре «Электрические системы» Белорусского национального технического университета программы на ЭВМ многовариантные расчеты позволили определить состав средств автоматизации для линий электропередачи в соответствии с критерием  $\text{ЧДД} > 0$ . В качестве примера на рисунке представлена кабельно-воздушная линия, на которой для целей автоматизации применены: реклоузер – 1 шт., выключатели нагрузки ВН-Н – 2 шт., выключатели ВНУ – в 4-х ТП – 10 шт., устройства УПН-ТП – 3 шт., устройства УПН-ВЛ – 2 шт.

Анализ оптимально размещенных средств автоматизации на линиях электропередачи напряжением 10 кВ в распределительных электрических сетях позволил сформулировать основные принципы их рациональной автоматизации:

1. Модернизация ТП с заменой выключателей нагрузки с ручным управлением на автоматическое, прежде всего, с ответственными потребителями (МТР, СТР и др.) с тем, чтобы расстояние между ними составляло, как правило, не менее 4–5 км.
2. В точках нормального разрыва замена коммутационного аппарата с ручным управлением на коммутационный аппарат с дистанционным управлением.
3. На длинных отпайках, особенно с лесными массивами, вместо ответвительного разъединителя устанавливается управляемый коммутационный аппарат (реклоузер с вакуумным выключателем или выключатель нагрузки с вакуумной камерой).

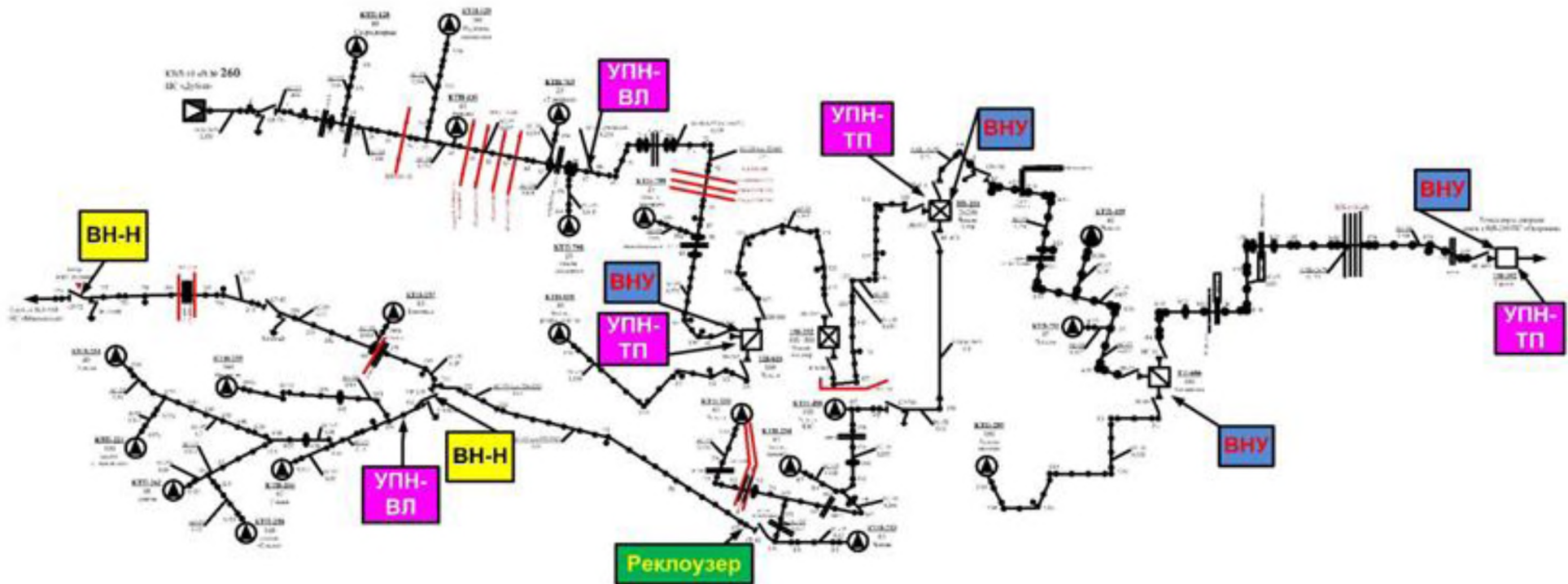


Схема кабельно-воздушной линии длиной 38,6 км и установленной мощности ТП 2836 кВА

4. Оставшиеся длинные участки магистрали и отпайки секционируются реклоузерами или выключателями нагрузки ВН–Н.

5. Указатели поврежденного направления (индикаторы повреждений) для фиксации токов короткого замыкания и определения замыканий на землю устанавливаются в питающих центрах, ТП и на воздушных линиях (с расчетом, чтобы расстояние между ними составляло, как правило, 3–5 км).

Следует отметить, что модернизация ТП для целей автоматизации возможна двумя путями:

1. Замена выключателя нагрузки с ручным управлением на автоматическое путем использования универсального комплекта адаптации (осуществление ретрофита).

2. Замера камеры КСО с выключателем нагрузки с ручным управлением на камеру КСО с выключателем нагрузки с дистанционным управлением.

Поскольку второй вариант более чем в 2 раза дороже первого, то в 80 % случаев предпочтение отдано первому варианту. Замена камер КСО применялась только в случае их полного физического износа и опасности для обслуживающего персонала.

Снижение затрат на автоматизацию распределительных электрических сетей возможно путем использования различных технических средств: выключателей нагрузки с автоматическим управлением внутренней и наружной установки, реклоузеров, указателей поврежденного направления в ТП и на ВЛ при технико-экономическом обосновании их применения.

### **Список литературы**

1. Воротницкий В.В. Распределительные сети 6(10) кВ – модернизация или автоматизация // Энергия и менеджмент. 2011. № 2. С. 11–15.

2. Страх И.А. Автоматизация РЭС: практический шаг на пути к «интеллектуальным сетям» // Энергия и менеджмент. 2016. № 6(93). С. 19–22.

3. ТКП 609–2017 (33240) Автоматизация распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ. Минск: Республика Беларусь, 2017.

4. Инструкция по определению эффективности использования средств, направляемых на выполнение энергосберегающих мероприятий: утв. Постановлением Министерства экономики Республики Беларусь, Министерства энергетики Республики Беларусь от 24 декабря 2003 г. №252/45/7.



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ООО «ЗАВОД ЭЛЕКТРОМАШИНА»

Андрей Сергеевич Карачёв<sup>1</sup>, Иван Николаевич Паскарь<sup>2</sup>

КузГТУ, г. Кемерово

<sup>1</sup>TRANSFORMATOR666KV@yandex.ru, <sup>2</sup>paskar-ivan@mail.ru

Прогнозирование электропотребления промышленного предприятия методами Хольта-Винтерса и адаптивного сглаживания Брауна.

**Ключевые слова:** методы прогнозирования, система электроснабжения, предприятие, электропотребление, графики электрической нагрузки.

## FORECASTING OF ELECTRIC CONSUMPTION OF “ELECTRIC MACHINE PLANT” LLC

A.S. Karachev, I.N. Paskar

Prediction of industrial power consumption by Holt–Winters and Brown's adaptive smoothing.

**Keywords:** forecasting methods, power supply system, enterprise, power consumption, electrical load graphs.

В настоящее время технический прогресс в производственной сфере очень быстро изменяется в сторону роста потребления электроэнергии промышленными предприятиями. Для того, чтобы удовлетворить растущие потребности предприятий в электропотреблении, необходимо осуществлять экономное ее расходование.

Повысить эффективность использования электроэнергии можно, совершенствуя структуру управления энергетикой промышленного предприятия.

С помощью прогнозирования потребления электроэнергии можно обеспечить нормальное функционирование электроэнергетической системы при резких изменениях потребления электроэнергии, снизить потери при передаче и распределении электрической энергии к потребителям, выравнивать графики активных нагрузок электроэнергетической системы предприятия.

Прогнозирование в энергетике является довольно актуальной темой, несмотря на то что исследований в этой области достаточно много. В данной статье рассматривается 2 метода прогнозирования электропотребления на примере ООО «Завод Электромашина», и найден наиболее оптимальный вариант развития электроснабжения данного предприятия на основе

выбранного метода. Предприятие основано в 2006 в городе Кемерово и занимается разработкой, проектированием, изготовлением, поставкой и монтажом высоковольтного горно-шахтного электрооборудования [4].

Были взяты данные по электропотреблению предприятия за 2015–2017 гг. По этим данным был сделан прогноз на следующий год с помощью методы Холта-Винтерса и адаптивного сглаживания Брауна.

Первым был использован метод Холта-Винтерса, включающий в себя три элемента: сезонность, тенденцию развития и сглаженный экспоненциальный ряд. Благодаря экспоненциальному сглаживанию, можно не только выявить направление развития ряда динамики, а также сгладить колебания в ряду динамики для поиска частных спадов и скачков. Сезонность дает возможность построить прогноз на будущие периоды.

Этот метод позволяет строить прогнозы на большой промежуток времени, потому что учитывает несколько факторов прогнозирования, именно поэтому он будет более точным при прогнозировании на длительный период времени.

Для выполнения прогноза использовался Microsoft Excel, в котором рассчитывался экспоненциально-сглаженный ряд. Коэффициент сглаживания ряда  $k$  задается нами вручную и находится в диапазоне от 0 до 1. Для первого периода в начале данных экспоненциально-сглаженный ряд равен первому значению ряда  $L_1 = y_1$ .

Затем определялся тренд. Коэффициент сглаживания тренда  $b$  задается также вручную и находится в диапазоне от 0 до 1. Значение тренда для первого периода равно 0.

Далее оценивалась сезонность. Коэффициент сезонности для первого года равен 1.

Теперь осуществляется прогноз, для метода Хольта-Винтерса также необходимо оценить точность прогноза. Точность прогноза рассчитывается по следующему алгоритму. Сначала находится значение прогнозной модели, затем ошибка модели. Расчет точности прогноза определяется, как отклонение ошибки модели от прогнозной модели.

Точность прогноза находится как разница между единицей и средним значением отклонений ошибок модели от прогнозной модели. Для оценки точности прогноза коэффициенты подбираются вручную.

На представленных ниже рисунках были получены график прогноза потребления электроэнергии и прогнозные значения на прогнозируемый период.

У данного прогноза точность согласно расчетам, опирающимся на прогноз предыдущих периодов, составила 97 %, что является достаточно хорошим показателем, учитывая сезонность процесса потребления электрической энергии.

Ниже представлены графики электропотребления и прогнозы электропотребления согласно методу Хольта-Винтерса активной и реактивной мощностей.

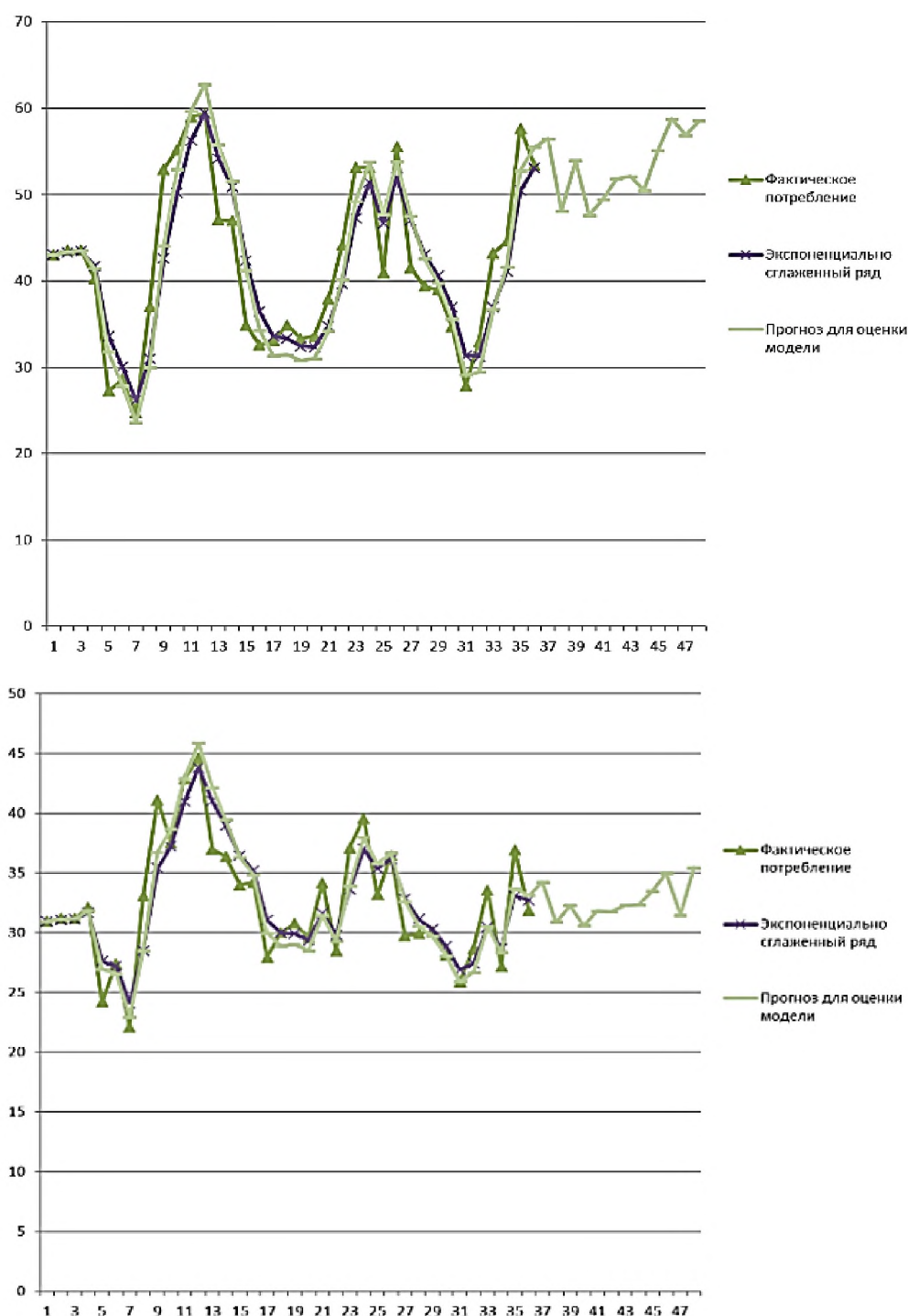


Рис. 1. График электропотребления активной и реактивной мощностей

Вторым методом для прогнозирования электропотребления будет адаптивная полиномиальная модель Р. Брауна, основанная на экспоненциальном сглаживании.

Модель Брауна имеет следующие достоинства: логичная и ясная идея построения модели; простота компьютерной реализации метода; возможность оптимизации модели путем подбора параметра адаптации.

Недостатком этой модели является использование единственного параметра адаптации  $\alpha$ . Это снижает диапазон применения, поскольку невозможно описать все многообразие рядов с помощью одной изменяемой величины.

Расчёт параметров осуществляется по рекуррентной формуле:

$$S_t = \alpha y_t + \beta S_{t-1}, \quad (1)$$

где  $S_t$  – значение экспоненциальной средней в момент  $t$ ;  $\alpha$  – параметр сглаживания,  $\alpha = \text{const}$ ;  $\beta = 1 - \alpha$ .

После того, как были вычислены экспоненциальные средние  $S_t$  по 1, они сами образуют временной ряд. Обозначим его члены через  $S_t$ . Верхний индекс показывает результат первого сглаживания. Этот ряд можно сгладить еще раз, воспользовавшись формулой:

$$S_t^{(2)} = \alpha S_t + \beta S_{t-1}^{(2)}, \quad (2)$$

Полученный сглаженный ряд  $S_t^{(2)}$  по отношению к исходному является дважды сглаженным, поэтому его называют экспоненциальной средней второго порядка.

Для прогнозирования временных рядов на основе адаптивных полиномиальных моделей следует выполнить следующие этапы:

1. Выбирается вид модели экспоненциального сглаживания, затем задается значение параметра сглаживания  $\alpha$ .
2. Определяются начальные условия.
3. Рассчитываются значения, соответствующим экспоненциальным средним значениям.
4. Определяются оценки коэффициентов модели.
5. Производится прогноз на одну точку вперед. Находится отклонение фактического значения временного ряда от прогнозируемого. Шаги данной процедуры повторяются для всех для  $t$ .

6. Окончательная модель прогноза формируется на последнем шаге в момент  $t = n$ . Вычисление по этим моделям можно улучшить за счет выбора параметра сглаживания  $\alpha$ .

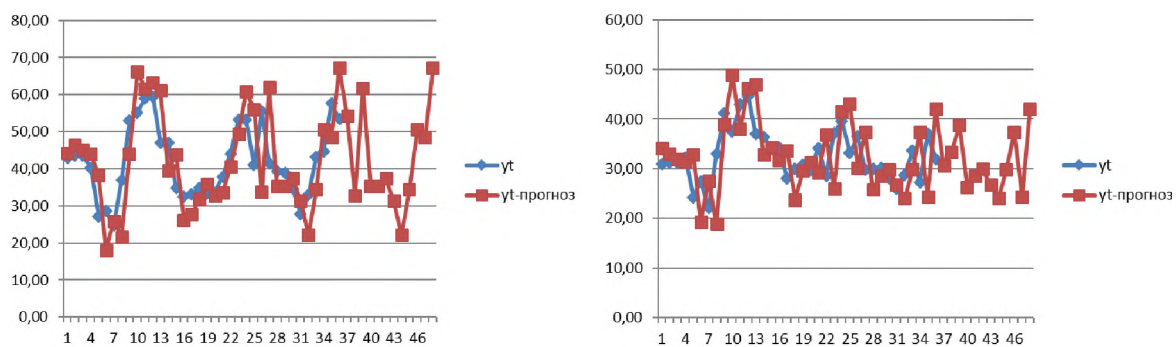


Рис. 2. Графики электропотребления активной и реактивной мощностей

Далее строится график для визуализации прогноза, и выделяется прогноз на следующие 12 месяцев с точностью 94,8 %.

Ниже представлены графики электропотребления и прогнозы электропотребления согласно методу адаптивного сглаживания Брауна активной и реактивной мощностей [1].

Из проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. На основе данных по электропотреблению предприятия были сделаны прогнозы по методу Холта-Винтерса с точностью в 97 % и адаптивной полиномиальной модели Р. Брауна с точностью 94,8 %.

2. Алгоритмы, рассмотренные в статье, обеспечивают прогноз на достаточно длительные промежутки времени с точностью, необходимой для планирования электропотребления [2].

3. Данные методы при использовании их на промышленном предприятии позволяют не нарушать установленные лимиты электропотребления, вследствие чего предприятие не будет штрафоваться [3].

### Список литературы

1. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ: Астрель, 2010. 703 с.
2. Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1987. 386 с.
3. Справочная книжка энергетика. 5-е изд.: перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 568 с.

4. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2-х кн. Кн. 2. Проектно-расчетные сведения / под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. М.: Энергия, 1981. 624 с.

УДК 004.9:620.9

## **ПРИМЕНЕНИЕ BIM ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Наталья Владимировна Роженцова<sup>1</sup>, Александр Владимирович Купоросов<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>natalia15969@yandex.ru, <sup>2</sup>skuporosov@mail.ru

BIM технология (Building Information Model) – процесс проектирования, создания и эксплуатации виртуальной копии элементов или системы всего объекта в целом. Это сравнительно новый подход к управлению жизненным циклом строительного объекта. Всё, что имеет отношения к объекту, рассматривается как единый объект. Однажды созданная 3D информационная модель объекта оперативно с помощью современных средств автоматизации поддерживается в актуальном состоянии. При этом можно оперативно отражать все изменения объектов в его жизненном цикле. Такая модель обеспечивает автоматизированное управление жизненным циклом объекта, контроль всех изменений в проекте при редактировании модели, а также обеспечивает возможность точного расчета затрат на эксплуатацию и обслуживание объекта на основе собранной воедино информации.

Bim-технология имеет неоспоримое преимущество перед предшественниками в технологиях проектирования и позволяет улучшить большое количество показателей при реализации строительного объекта.

**Ключевые слова:** BIM-технология, BIM-моделирование, 3D информационная модель, жизненный цикл, автоматизация, CAD-технология, единая информация.

## **APPLICATION OF BIM TECHNOLOGY IN THE DESIGN AND OPERATION OF ELECTRIC POWER INDUSTRY OBJECTS**

N.V. Rozhentsova, A.V. Kuporosov

BIM technology (Building Information Model) – the process of designing, creating and operating a virtual copy of the elements or system of the entire object as a whole. This is a relatively new approach to managing the life cycle of a construction site. Everything that has to do with an object is considered as a single object. Once created, the 3D information model of the object is operatively updated with the help of modern automation tools. At the same time, you can quickly reflect all changes in objects in its life cycle. Such a model provides automated management of the life cycle of an object, control of all changes in the project, while editing the model, and also provides us with an accurate calculation of the costs of operating and maintaining the object based on the information gathered together.

BIM-technology has an indisputable advantage over its predecessors design technologies and allows to improve a large number of indicators in the implementation of a construction object.

**Keywords:** BIM technology, BIM modeling, 3D information model, life cycle, automation, CAD technology, unified information.

Сегодня главной задачей всех современных стратегических отраслей в области проектирования в электроэнергетике является решение проблем, связанных с развитием информационного моделирования

В связи со сложными процессами, которые происходят на том или ином производстве, оно всё больше нуждается в автоматизации. Использование информационных технологий должным образом не только в архитектуре, но и при создании и эксплуатации энергетических объектов, позволяет добиться снижения финансовых затрат и временных издержек.

Информационное моделирование сооружений (Building Information Model) – это метод создания полноценного информационного описания строящегося объекта, в котором предусматривается процесс сбора и комплексной обработки на протяжении создания строящегося сооружения воедино. На основе имеющихся данных собранных из разделов архитектуры, конструктивных данных, экономической и инженерной части проекта в дальнейших жизненных циклах можно создать и применить интегрированную работу всех участников, возвести цифровую модель, которая будет дополняться и изменяться по ходу реализации, точную логистическую, административно-юридическую и финансовую модель. Непосредственно при всём этом создаётся хранилище всей информации по проекту, всех договоров, регламентов, транзакций, СНиПов, ГОСТов и т. д. [1].

В связи с поручением Президента РФ В.В. Путина правительству России перейти до 1 июля 2019 г. к системе управления жизненным циклом объектов путем внедрения технологий информационного моделирования, большое количество разработчиков ИТС получили полную свободу действий к реализации своих технологий.

Для большинства организаций основной целью внедрения BIM-технологии является уменьшение количества технологических ошибок и улучшение качества в проектной документации. Также её использование автоматизирует подсчёт смет для реализации проекта. Наконец, появилась возможность устранять коллизию прямо на интегрированной площадке. Все участники реализации проекта будут автоматически уведомлены об изменении проекта, которые были произведены после выявления технологических ошибок и несоответствий между разными разделами проекта.

По всей мере возможности информационная модель может быть вплетена в производственный процесс, в этом случае к ней получают полный контроль. В дальнейшем при эксплуатации можно анализировать состояние объектов энергосистемы, производить планирование работ, а также контролировать результаты проведенных работ [2].

Однако, несмотря на все положительные аспекты, касаясь информационного моделирования, не стоит и забывать о том, что на первоначальных этапах придется столкнуться с некоторыми затруднениями.

Основной проблемой применения информационного моделирования является незаинтересованность непосредственно самих организаций. Причиной этому можно назвать дороговизну внедрения технологии на самых ранних этапах. Ещё одной проблемой может являться несоответствие норм рабочей документации [3].

Прибегая к статистике, за последние три года бурного развития в энергетической отрасли неизбежны изменения для всех участников рынка. Исходя из этого, отечественным специалистам необходимо пересмотреть свое отношение к новым методикам проектно-производственного и эксплуатационного процесса в энергетике, целиком интегрированному BIM [4]. Стоит учитывать также и готовность компаний электроэнергетической отрасли, ведь их готовность к применению информационных технологий является очень яркой разницей [5]. Единственный аспект заключается в том, что направление BIM-технологии может на данном этапе внедрения и развития использоваться только для решений задач узкого профиля [6]. Также стоит акцентировать стимуляцию специалистов электроэнергетической отрасли к широкому применению BIM-технологии.

### **Список литературы**

1. Саленик И.И. BIM-технологий в энергетике // Актуальные проблемы энергетики – 2016: матер. науч.-техн. конференции студентов и аспирантов. Минск, 2017. С. 365–366.
2. Мялковский И.К. Взаимодействие информационных систем в жизненном цикле объекта электроэнергетики и электротехники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 258 с.
3. Российская BIM-система [сайт]. URL: <https://rengabim.com/press-rum/renga-v-smi/bim-ot-proekta-do-gotovogo-zdaniya-informacionnoe-modelirovanie-v-stroitelnoj-otrasli/>



4. Сираев Л.И., Роженцова Н.В. Моделирование гибридной системы электроснабжения промышленного предприятия /Сборник: Фёдоровские чтения – 2017 XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. 2017. С. 338–340.

5. Денисова А.Р., Роженцова Н.В. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2010. 248 с.

6. Низамутдинов Р.Р., Фетисов Л.В. Плавный запуск электропривода нагнетателя сжатого воздуха с функцией поддержания заданного давления как способ регулирования воздуходувок для аэрации сточных вод // Фёдоровские чтения – 2016: сб. тр. XLVI Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы / под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. М., 2016. С. 94–97.

УДК 621.316.11

## **УПРАВЛЕНИЕ РЕМОНТАМИ ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ**

Владимир Михайлович Левин

НГТУ, г. Новосибирск

levin@corp.nstu.ru

Аварийные отключения оборудования в системах электроснабжения нефтепромыслов приводят к нежелательным последствиям, тяжесть которых выражается математическим ожиданием ущерба. Целями управления ремонтами оборудования могут служить как поддержание работоспособного технического состояния и максимальной надежности, так и обеспечение минимального суммарного ущерба от аварийных потерь. Предложены вероятностные математические модели и методика принятия решений по приоритизации ремонтных воздействий с учетом случайных факторов и вариативности целей управления. Продемонстрированы принципиальные отличия в реализации указанных целей управления ремонтами.

**Ключевые слова:** электрооборудование, аварийные отключения, риск отказа, приоритизация ремонтов, техническое состояние, математическое ожидание ущерба, критерии принятия решений.

## **MANAGEMENT OF EQUIPMENT REPAIRS IN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS OF OIL FIELDS**

V.M. Levin

Emergency shutdowns of equipment in power supply systems of oil fields lead to undesirable consequences, the severity of which is expressed by the mathematical expectation of damage. The objectives of managing the repair of equipment can serve as maintaining an operational

technical condition and maximum reliability, as well as ensuring the minimum total damage from accidental losses. Probabilistic mathematical models and methods of decision-making on the prioritization of repair effects are proposed, taking into account random factors and the variability of control objectives. Fundamental differences in the implementation of repairs goals management are demonstrated.

**Keywords:** electrical equipment, emergency shutdowns, risk of failure, prioritization of repairs, technical condition, mathematical expectation of damage, decision criteria.

Риск отказов оборудования в электрических сетях промышленных предприятий, как правило, связан с нарушениями электроснабжения потребителей, простоями и поломками энергоустановок, угрозами экологии и безопасности персонала и пр. В системах электроснабжения нефтепромыслов основная составляющая риска обусловлена недовыработкой или технологическими потерями добычи нефти [1].

Аварийный ущерб на рассматриваемом интервале эксплуатации  $T$  определяется как вероятностью нарушения электроснабжения технологических потребителей по причине отказа  $i$ -го элемента сети ( $Q_i$ ), так и тяжестью возникающих нежелательных последствий (объемом потерь  $\Delta\P$ ). Для вычисления вероятности отказа оборудования сети необходимо располагать информацией о средней интенсивности отказов группы однотипного оборудования со схожими условиями эксплуатации  $\bar{\omega}_{\text{ср}}$ . Подобные данные могут быть получены только в результате обработки специально сформированной статистической выборки [2]. Полученный таким образом показатель  $\bar{\omega}_{\text{ср}}$  характеризует интенсивность внезапных отказов по причинам, не зависящим от фактического технического состояния оборудования. Фактическое техническое состояние  $i$ -й единицы оборудования количественно характеризует другой показатель – индекс технического состояния (ИТС), который вычисляется согласно рекомендациям [3] как средневзвешенное значение ИТС функциональных узлов, измеряемое в диапазоне от 1 (наилучшее) до 0 (наихудшее). В свою очередь ИТС  $j$ -го функционального узла вычисляется как средневзвешенное значение оценки  $k$  групп контролируемых параметров состояния. Учет фактического технического состояния единицы оборудования, отличного от наилучшего, приводит к уменьшению вероятности ее безотказной работы и, соответственно, к увеличению вероятности отказа:

$$Q_i = 1 - \exp(-\alpha \bar{\omega}_{\text{ср}}) \cdot J_i. \quad (1)$$

Здесь  $J_i$  – текущее значение индекса технического состояния  $i$ -й единицы оборудования сети. Расчет значения аварийных потерь добычи нефти классически выполняется по следующей формуле:

$$\Delta\Pi = P_{\text{нагр}} \cdot \Delta t \cdot D,$$

где  $P_{\text{нагр}}$  – мощность технологических потребителей, потерявших электропитание по причине отказа  $i$ -го элемента сети, кВт;  $\Delta t$  – время перерыва электроснабжения, ч;  $D$  – удельная производительность добычи, т/кВт·ч.

В ряде случаев при наличии однородной и представительной статистики аварийных потерь добычи нефти потребителей выделенного производства удастся разработать математическую модель на основе вероятностных характеристик наблюдаемого случайного потока событий [1]. В качестве таких вероятностных характеристик определяются среднее значение аварийных потерь  $\Delta\bar{\Pi}_{\text{ср}}$  и средняя интенсивность потерь  $\bar{\omega}_{\Delta\Pi}$ . В этом случае значение аварийных потерь добычи нефти в вероятностной постановке при отказе  $i$ -го элемента сети будет рассчитываться по выражению:

$$\Delta\Pi = \Delta\bar{\Pi}_{\text{ср}} \cdot (1 - \exp(-\bar{\omega}_{\Delta\Pi})).$$

Риск аварийного отказа  $i$ -го элемента электрической сети нефтепромыслов определяется как математическое ожидание ущерба от аварийных потерь добычи нефти:

$$\bar{Y}_{si} = P_{\text{нагр}} \cdot \Delta t \cdot D \cdot Q_i \cdot c, \quad (2)$$

где  $c$  – удельная стоимость потерь, руб./т.

Важным обстоятельством при принятии решения о приложении ремонтного воздействия к оборудованию системы электроснабжения нефтепромыслов является выбор критерия (цели) управления. Очевидно, выполнение одного из критериев, сформированных на основе показателей (1)  $Q \rightarrow \min$  и (2)  $Y_{si} \rightarrow \min$ , будет приводить к разным результатам. Это вызвано тем, что высокая вероятность отказа единицы электрооборудования с ухудшенным техническим состоянием (низким значением  $J$ ) не всегда сопутствует высокой тяжести последствий. И наоборот, малое значение ущерба от аварийных потерь добычи нефти может наблюдаться при значительной вероятности отказа оборудования. Указанное обстоятельство учитывается при выборе различных стратегий управления ремонтами

электрооборудования [4]. Так критерий (1) направлен на поддержание стратегии «по техническому состоянию» (Condition Based Maintenance), а критерию (2) соответствует стратегия «по оценке прогнозируемых рисков» (Risk Based Maintenance).

Рассмотрим в качестве примера два одинаковых объекта – воздушные линии (ВЛ) 6 кВ, работающие в одинаковых условиях. Оба сетевых объекта имеют в своем составе две цепи ВЛ длиной около 2 км, выполненные на металлических опорах проводом АС–95. Первый объект (ВЛ–1) обеспечивает электроснабжение технологических потребителей дожимной насосной станции с устройством предварительного сброса пластовой воды (ДНС с УПСВ) мощностью  $P_{\text{нагр}} = 1000$  кВт,  $\Delta t = 1$  ч,  $D = 0,01$  т/кВт·ч. Вторым объектом (ВЛ–2) питает потребителей кустовой площадки нефтяных скважин суммарной мощностью  $P_{\text{нагр}} = 1000$  кВт,  $\Delta t = 0,015$  ч,  $D = 10$  т/кВт·ч.

Пусть состояние ВЛ-1 и ВЛ-2 характеризуется наличием одиночного дефекта. Только в случае ВЛ-1 дефектом является наличие нарушений габарита (провес проводов), угрожающих схлестыванием, а в случае ВЛ-2 дефектом является наличие на краю просеки, угрожающего падением одиночного дерева. Расчеты ИТС по методике [3] приведены в таблице. В расчетах приняты оценки групп параметров состояния отдельных функциональных узлов единицы оборудования в диапазоне от 10 (наилучшее) до 1 (наихудшее). По результатам расчетов ИТС функциональных узлов вычисляется оценка ИТС каждого из объектов в целом:

$$J_{\text{ВЛ-1}} = 1 \cdot 0,334 + 0,37 \cdot 0,666 = 0,58;$$

$$J_{\text{ВЛ-2}} = 1 \cdot 0,334 + 0,73 \cdot 0,666 = 0,82.$$

Подстановка  $J_i$  в (1) позволяет получить значение вероятности отказа каждого объекта с учетом его фактического технического состояния ( $\bar{\omega}_{\text{ср}} = 0,202 \text{ г}^{-1}$ ):

$$Q_{\text{ВЛ-1}} = 1 - \exp(-0,202) \cdot 0,58 = 0,526;$$

$$Q_{\text{ВЛ-2}} = 1 - \exp(-0,202) \cdot 0,82 = 0,299.$$

По выражению (2) при найденных вероятностях отказа ВЛ-1 и ВЛ-2 определим значение ущерба от аварийных потерь добычи нефти. При этом удельная стоимость потерь принимается из расчета 15 тыс. руб. за 1 т:

$$Y_{\text{сВЛ-1}} = 1000 \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot 0,526 \cdot 15 \cdot 10^3 = 78,9 \text{ тыс. руб.};$$

$$Y_{\text{сВЛ-2}} = 1000 \cdot 0,015 \cdot 10 \cdot 0,299 \cdot 15 \cdot 10^3 = 78,9 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица

Результаты расчета ИТС функциональных узлов ВЛ-1 и ВЛ-2

| Узел   | Группа параметров                                                            | Оценка группы параметров в баллах | «Вес» группы параметров в оценке узла | ИТС функциональных узлов                                                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Опора  | Крепления опоры, стойки, траверсы, крюка, изолятора на стойке опоры, провода | 10                                | 0,3                                   | ВЛ-1 и ВЛ-2:<br>$\frac{0,3 \cdot 10 + 0,1 \cdot 10}{10} + \frac{0,2 \cdot 10}{10} + \frac{0,1 \cdot 10 + 0,3 \cdot 10}{10} = 1$ |
|        | Приставка, стойка, подкос                                                    | 10                                | 0,1                                   |                                                                                                                                 |
|        | Траверса, крюк, изолятор на траверсе                                         | 10                                | 0,2                                   |                                                                                                                                 |
|        | Заземляющее устройство                                                       | 10                                | 0,1                                   |                                                                                                                                 |
|        | Коммутационные аппараты, разрядники                                          | 10                                | 0,3                                   |                                                                                                                                 |
| Пролет | Трасса ВЛ                                                                    | 10 (1)                            | 0,3                                   | ВЛ-1:<br>$\frac{0,3 \cdot 10 + 0,7 \cdot 1}{10} = 0,37$ ВЛ-2:<br>$\frac{0,3 \cdot 1 + 0,7 \cdot 10}{10} = 0,73$                 |
|        | Провод, кабельная вставка                                                    | 1 (10)                            | 0,7                                   |                                                                                                                                 |

Таким образом, в рамках стратегии «по техническому состоянию» приоритетным для введения ремонтного воздействия объектом является ВЛ-1 с наихудшим ИТС и наибольшей вероятностью отказа. В рамках стратегии «по оценке прогнозируемого риска» приоритет в очередности выполнения ремонта следует отдать ВЛ-2, аварийный отказ которой приводит к нежелательным последствиям большей степени тяжести.

Вариативность целей управления ремонтами оборудования остается приоритетной задачей энергокомпании, осуществляющей электроснабжение потребителей нефтедобычи, и обеспечивается в рамках выбранной стратегии эксплуатации.

Цели и критерии управления ремонтами электрооборудования определяют комплекс расчетных моделей и методов для принятия решений по приоритизации корректирующих воздействий по объектам электрической сети.

Рассмотрена реализация вариативных целей управления ремонтами оборудования электрической сети нефтепромыслов. Показано существенное различие в результатах принятия решений по приоритизации введения корректирующих воздействий.

### Список литературы

1. Левин В.М. Оценка риска отказов оборудования в электрической сети нефтепромыслов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 275–279.
2. Левин В.М. Повышение надежности электрооборудования нефтедобывающего комплекса // Главный энергетик. 2013. № 11. С. 61–68.
3. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи, электрических станций и электрических сетей: утв. Приказом Минэнерго РФ № 676 от 26 июля 2017 г.
4. Левин В.М., Рычагова Е.А., Сорокин И.В. Оптимизационные модели технического обслуживания и ремонтов электрооборудования передачи и распределения // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Казань, 2015. № 2. С. 20–29.

УДК 628.9

### ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ИЗБАВЛЕНИЯ ОТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ СИГНАЛИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Леонид Валерьевич Фетисов<sup>1</sup>, Данил Геннадьевич Маврин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>leonidfetisov@mail.ru, <sup>2</sup>xxx2013.x@yandex.ru

В статье рассмотрен пример внедрения логических контроллеров на примере внутридомовых систем освещения.

**Ключевые слова:** программируемый логический контроллер, общедомовые нужды, энергоэффективность, быстроедействие, программа, сигнализирующая система.

## THE APPLICATION OF THE LOGICAL CONTROLLER SIGNALING DEVICES ELECTRICAL SYSTEMS

L.V. Fetisov, D.G. Mavrin

The article describes an example of the introduction of logic controllers on the example of in-house lighting systems.

**Key words:** programmable logic controller, General house needs, energy efficiency, speed, program, signaling system.

Большинство сигнализирующих систем в своей основе опираются на чувствительную часть. К ним относятся: охранные системы в сигнализации автомобиля; системы открытия багажника ногой в некоторых марках автомобилей; системы внутридомового освещения и т. д.

Рассмотрим внедрение программируемого логического контроллера (ПЛК) на примере улучшения систем внутридомового освещения, так как это может принести наибольшую пользу. Мы можем существенно экономить на коммунальных услугах общих домовых нужд (ОДН). Коммунальные услуги ОДН – это коммунальные услуги, которые используются в процессе содержания общего имущества в многоквартирном доме.

На данный момент в системы внутридомового освещения для экономии электроэнергии повсеместно внедрены сигнализирующие устройства по типу датчиков объема и датчиков шума. Системы позволяют значительно экономить электроэнергию, затраченную на освещения подъездов. В темное время суток уходит необходимость в постоянно включенном свете. Для установки не нужны никакие дополнительные разрешения. У данных систем подъездного освещения множество плюсов, но, к сожалению, не обходится и без минусов.

Если говорить о датчиках объема, то изделия из ценовой категории «эконом» комплектуются слабыми акустическими сенсорами (если речь идет об ультразвуковой модификации), что напрямую влияет на их работу, а также увеличивает частоту ложных срабатываний, да и несмотря на функцию отсеивания «паразитных» шумов, при неправильной настройке вероятно ложное срабатывание.

Датчики шума имеют больше недостатков, один из которых невозможность размещения в местах, где много шума в зоне их действия. Это вполне может означать, что в новостройках датчик будет работать весь день, да и качество и чувствительность имеет геометрическую зависимость с ценой. Также имеют место ложные срабатывания.

И, наверное, главный минус, относящийся к обоим типам устройств, это отсутствие выбора режима работы в зависимости от времени суток. В дневное время, когда естественного освещения более чем достаточно, датчики продолжают свою работу.

Мы же, предлагаем внедрить в эти системы ПЛК. Программируемый контроллер – специальная разновидность электронной вычислительной машины. Чаще всего ПЛК используют для автоматизации технологических процессов. В качестве основного режима работы ПЛК выступает его длительное автономное использование зачастую в неблагоприятных условиях окружающей среды без серьезного обслуживания и практически без вмешательства человека.

На рис. 1 изображена структурная схема ПЛК, которая может применяться для освещения помещений.

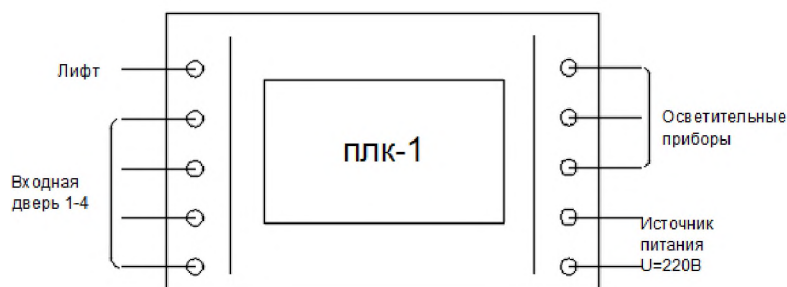


Рис. 1. Структурная схема ПЛК

В ПЛК (для стандартного подъезда на 4 квартиры) входят 2 выхода питания, выходы на осветительные приборы помещения, выходы для приема сигнала с дверей квартиры и лифта.

В предложенной системе освещения, изображенной на рис. 2, отсутствует чувствительная часть. Ее мы заменим катушками, или герконами, рассмотрим систему с катушками. Срабатывает система в момент разрыва контакта между питающей и сигнализирующей катушкой. Питающая катушка (ПК) расположена на входной двери квартиры, сигнализирующая (СК) строго над ней.

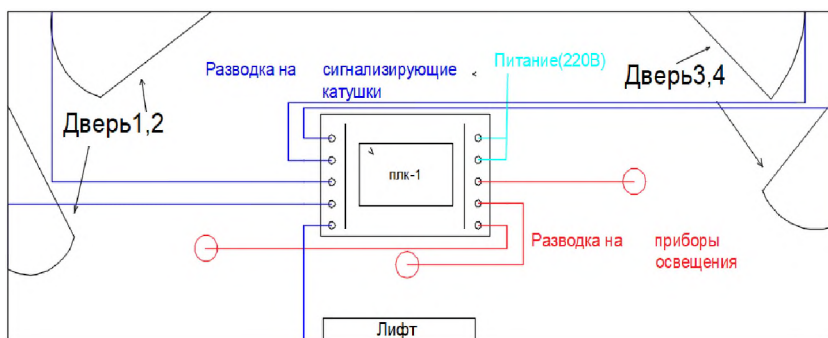


Рис. 2. Система освещения на ПЛК и сигнализирующих катушках



Более подробно рассмотрим систему освещения на двух примерах.

**Пример 1.** Выход в зону освещения с квартиры.

Питающая катушка расположена непосредственно на двери, сигнализирующая – максимально близко, но уже на откосе, над дверью (рис. 3).

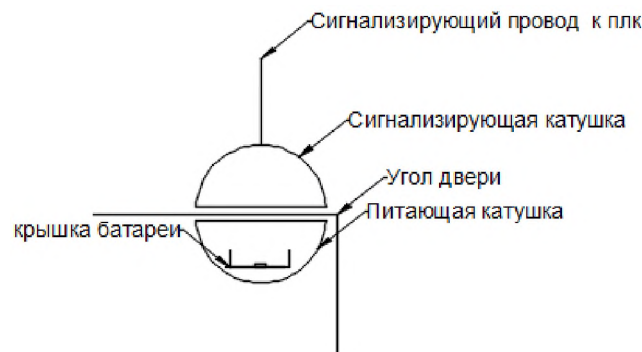


Рис. 3. Схема расположения катушек

СК состоит из медной катушки, АКБ и корпуса. Катушка подключена к источнику питания, тем самым возникает электромагнитное поле, которое наводит в сигнализирующей катушке индукционный ток. Этот ток сигнализирует, что дверь закрыта, и свет не нужен.

Индукционный ток – электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, пронизывающего этот контур [2]. Как только контур разрывается открытием двери, ток пропадает, это сигнализирует ПЛК, включая на заложенное время свет. После закрытия двери, свет не гаснет, так как на контроллере можно задать выдержку, которая будет активироваться, как только будет пропадать ток на катушке.

**Пример 2.** Выход из лифта – дорога домой.

Расположение катушек изображено на рис. 4. Так как у лифта две пары дверей, внутренняя и внешняя, мы задействуем только 1 из 4 раздвижных дверей. Питающая катушка установлена на внешнюю (лицевую) дверь лифта, с внутренней стороны.

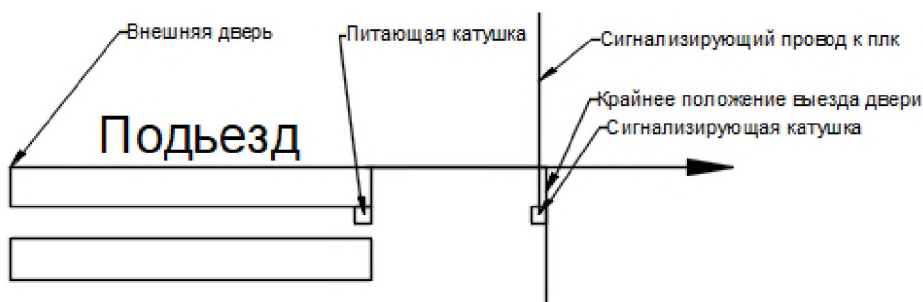


Рис. 4. Схема расположение катушек внутри шахты лифта

Как только дверь откроется, и займет свое крайнее положение, в сигнализирующей катушке наведется индукционный ток, и ПЛК сигнализируя этот ток, включит свет. Аналогично с примером 1 будет запущена выдержка времени, которая позволит спокойно открыть дверь и войти домой.

В системах управления технологическими объектами логические команды, как правило, преобладают над арифметическими операциями над числами с плавающей точкой, что позволяет при сравнительной простоте микроконтроллера (шины шириной 8 или 16 разрядов), получить мощные системы, действующие в режиме реального времени. В современных ПЛК числовые операции в языках их программирования реализуются наравне с логическими. Все языки программирования ПЛК имеют лёгкий доступ к манипулированию битами в машинных словах в отличие от большинства высокоуровневых языков программирования современных компьютеров [3]. А если сказать проще, то не затруднит написать программу для подъезда любой сложности, то есть приведенную систему, а точнее ее принцип работы, можно использовать для работы в любом помещении.

В рассмотренной нами системе освещения имеется целый ряд преимуществ по сравнению с уже используемыми аналогами.

Наверное, самый главный плюс – это возможность задать время суток для работы, например, только в темное время суток [4]. А такая избирательность дает возможность существенно экономить потребленную электроэнергию. Немаловажным преимуществом является отсутствие ложных срабатываний, так как в данной системе нет чувствительных органов [5], повышается быстродействие, также можно задать избирательность, т.е. при открытии левой двери загорается ближняя к ней лампа, оставляя дальний конец помещения неосвещенным. Всего этого можно легко добиться с внедрением ПЛК [6].

### **Список литературы**

1. О порядке предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений многоквартирных домов и жилых домов: постановление Правительства Российской Федерации от 1 января 2017 г. № 354.
2. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, 2001. Т. 2. 360 с.
3. Программируемый логический контроллер // Википедия: свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Программируемый логический контроллер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Программируемый_логический_контроллер) (дата обращения: 01.12.18).

4. Роженцова Н.В., Шипилов В.В. Сверхпроводящие линии электропередач // Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике / Н.К. Андреев [и др.]: под ред. Э.В. Шамсутдинова и О.С. Зуевой. Казань, 2014. С. 219–227.

5. Иванова В.Р. Нейросетевой алгоритм управления искусственным освещением // Развитие информационно-ресурсного обеспечения образования и науки в горно-металлургической отрасли и на транспорте – 2014: сб. науч. тр. Междунар. конф. 2014. С. 208–212.

6. Иванова В.Р., Садыков М.Ф., Шириев Р.Р. Инновационная система управления внутренним освещением с использованием нейросетевого алгоритма // Новые материалы и технологии в условиях Арктики: матер. Междунар. симпозиума / Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова. 2014. С. 304–308.

УДК 681.51

## АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ПОТРЕБИТЕЛЯ

Наталья Владимировна Роженцова<sup>1</sup>, Оксана Сергеевна Регир<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>natalia15969@yandex.ru, <sup>2</sup>ksu-zeya@mail.ru

В данной статье рассматривается возможность применения агентного моделирования в качестве метода исследования функционирующего электрохозяйства потребителя на примере офисного помещения. Показаны этапы построения агентной модели в имитационной среде AnyLogic, приведены результаты моделирования. Описаны перспективы развития и практического применения модели.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, потребитель, имитационное моделирование, AnyLogic, агент, распределенная генерация, интеллектуальные сети.

## AGENT MODELING OF THE CONSUMER'S ELECTRICAL EQUIPMENT

N.V. Rozhentsova, O.S. Regir

This article discusses the possibility of using agent modeling as a research method for a functioning consumer's electrical equipment using the example of an office space. The stages of building an agent model in the simulation environment Any Logic are shown, and the simulation results are presented. The prospects for the development and practical application of the model are described.

**Key words:** electric power industry, consumer, simulation modeling, AnyLogic, agent, distributed generation, Smart Grid.

Развитие рыночных отношений в электроэнергетике неизбежно приводит к появлению новых задач и, как следствие, к постоянному усложнению электроэнергетических сетей.

Классическая электроэнергетическая сеть изначально представляет собой централизованную однонаправленную систему генерации, передачи и распределения электроэнергии, где потребитель играет подчинённую (пассивную) роль [1]. Сегодня потребитель посредством установок малой генерации способен как обеспечивать себя электроэнергией, так и отдавать излишки в общую сеть, подразумевая двунаправленность сети [2].

Возникновение категории активных потребителей требует локального управления микросетями на основе различных параметров: состояния внешней сети, климатических условий, режима работы электроприёмников, графиков ТО и Р, цен на электроэнергию и т. д.

В качестве объекта исследования было выбрано ООО «БАРС Медицина». Данное предприятие занимается организацией предварительных и периодических медосмотров лиц, работающих на производствах с вредными и опасными для здоровья факторами. В штате организации числится 14 человек. График работы: с понедельника по пятницу с 8:30 до 17:30 с перерывом на обед (12:30 – 13:30).

Офисное помещение оснащено всей необходимой для работы оргтехникой, бытовыми электроприборами в комнате для приёма пищи в обеденное время, а также системами освещения и климат-контроля.

Работа любого электроприёмника определяется поведением человека, взаимодействующего с этим электроприёмником, и для нашей цели моделируется упрощённым графиком работы. Например, в начале рабочего дня сотрудник офиса включает персональный компьютер, который остаётся в таком состоянии весь рабочий день, за исключением перерыва на обед. А микроволновой печью, наоборот, сотрудник пользуется только в обед (в табл. 1 собраны графики работы электроприёмников потребителя, которые впоследствии будут использованы в модели).

Разработка модели выполнялась в версии AnyLogic Personal Learning Edition (для начинающих и студентов) 8.3.2, выпущенной 16 июля 2018 г. [5]. Параметры электроприёмников, данные их графиков работы и ТО и Р в организации должны храниться в CIM (Common Information-Model). CIM включает в себя НСИ (нормативно-справочную информацию) электроприёмников и базу динамических данных – данных измерений (например, данные со счётчиков).

Для имитации загрузки данных из CIM была создана база данных. Базы данных в среде AnyLogic формируются путём импорта из Excel/Access. Книга Power.xlsx создана вручную на основе таблицы и представлена на рис. 1.

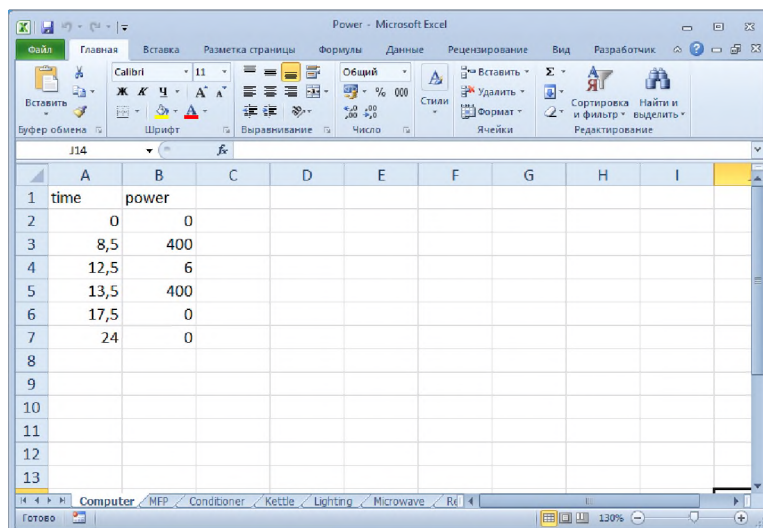


Рис. 1. Данные потребления мощности ПК

Таблица

График работы электроприёмников потребителя

| Наименование           | Кол-во | График работы                                            | Потребляемая мощность, Вт |
|------------------------|--------|----------------------------------------------------------|---------------------------|
| Персональный компьютер | 14     | 8:30 – 12:30, 13:30 – 17:30                              | 400                       |
|                        |        | 12:30 – 13:30, спящий режим                              | 6                         |
| МФУ                    | 1      | 8:30 – 12:30 и 13:30 – 17:30 по 5 мин                    | 200                       |
|                        |        | 8:30 – 12:30 и 13:30 – 17:30 по 10 мин, режим ожидания   | 10                        |
| Кондиционер            | 3      | 10:00 – 16:00                                            | 820                       |
| Электрический чайник   | 1      | 8:30 – 8:45, 10:00 – 10:15, 12:30 – 13:30, 16:00 – 16:15 | 1500                      |
| Микроволновая печь     | 1      | 12:30 – 13:30                                            | 1200                      |
| Холодильник            | 1      | 8:25 – 8:30, 12:30 – 13:30, работа компрессора           | 300                       |
|                        |        | 8:30 – 12:30, 13:30 – 8:25                               | 150                       |
| Светильник             | 35     | 8:15 – 17:45                                             | 72                        |
| Телефон                | 12     | 24 часа в сутки                                          | 4                         |

Каждый электроприёмник моделируется отдельным агентом. Методика создания таких агентов разобрана на примере персонального компьютера.

Создаётся новый агент **Computer** без параметров и анимации. В графическом редакторе с помощью табличной функции **Power** импортируем элементы базы данных для ПК. Для упрощения модели допускается, что компьютер может находиться в трёх состояниях: отключено (**off**), сложное состояние включено (**on**), состоящее из спящего (**sleep**) и рабочего (**work**) режима.

Все состояния соединяются логическими переходами, образуя диаграмму состояний агента **Computer**.

Для отслеживания и использования текущего модельного времени в десятичном виде создаётся динамическая переменная **controlTime**.

Визуализация потребляемой мощности агента осуществляется с помощью графика и набора данных. Для удобства восприятия добавляется индикатор состояния агента. Цвета соответствуют состояниям: **off** – красный, **work** – зелёный, **sleep** – жёлтый. Таким образом, сформирован агент **Computer** – рис. 2.

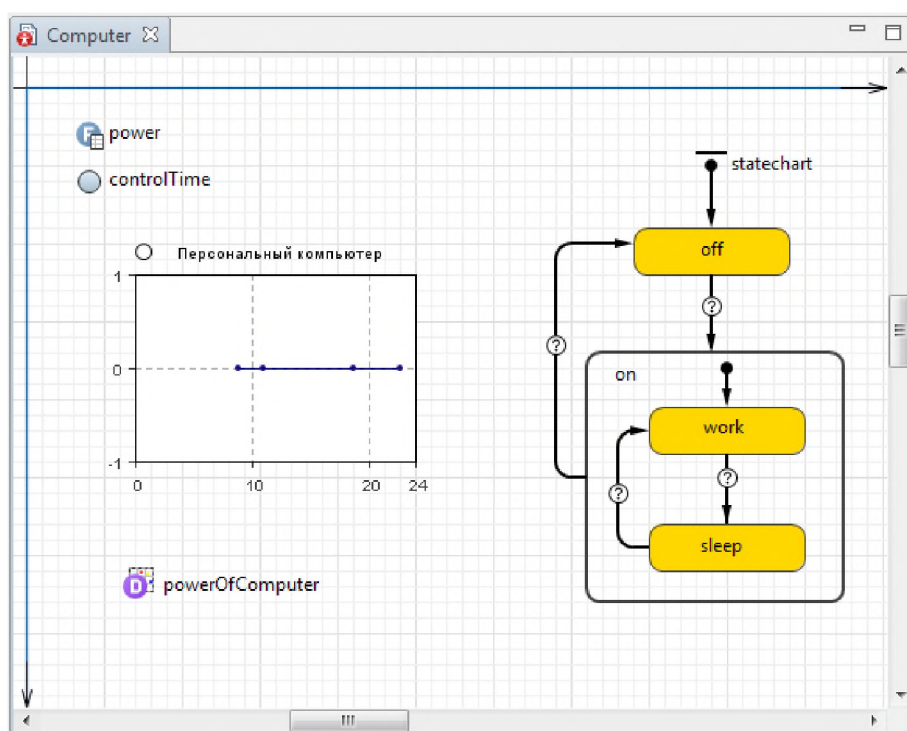


Рис. 2. Агент Computer

Остальные агенты формируются аналогично. В результате получается 8 типов агентов, отличающихся диаграммами состояний.

В область графического редактора агента **Main** помещаются все типы агентов и их графики потребляемой мощности. Формируются область Агенты и Количество агентов.

Для наглядности добавляются **Часы**. Настраивается суммарный график потребления электроэнергии.

Скомплектованная модель представлена на рис. 3.

Параметры режима симуляции:

- единица модельного времени – час;
- конечное модельное время – 24 часа (сутки).

При запуске модели прослеживается изменение величин мощности как отдельных электроприёмников, так и потребителя в целом. Результаты запуска модели на рис. 3.



Рис. 3. Визуализация и результаты запуска модели

Разработанная модель находится в открытом доступе в онлайн-сервисе AnyLogicCloud [6]. Она позволяет проводить контроль потребления электроэнергии, наглядно демонстрирует пики нагрузки. Таким образом, методика построения таких моделей пригодна и для крупных промышленных предприятий. Такая модель будет обладать большим количеством параметров, правил, состояний и событий, но это не делает её недостижимой [7].

Агентная модель может найти своё применение в нескольких направлениях. Во-первых, как экспериментальная площадка для решений оптимизации. Разрабатывается множество проектов, некоторая часть которых впоследствии не являются рентабельными. С помощью модели можно ещё на стадии проектирования проверить выдвинутые гипотезы в абсолютно безрисковой среде [8]. Во-вторых, как базовая платформа для развития «интеллектуальных сетей». Агентная модель позволит не только моделировать, но и наблюдать за сложным поведением нового активного потребителя, а совокупность таких моделей – изучить активность сети (конгломерата активных потребителей) [9].

## Список литературы

1. Купреев Д.А. Управление инновационным развитием распределенной энергетики в России // Управление экономическими системами. 2015. № 10(82).
2. Попова С.Н., Потехина Н.В. Перспективы и ограничения развития распределенной энергетики на электроэнергетическом рынке России // Общество: политика, экономика, право. 2016. № 12. 54–48 с.
3. Марьясин О.Ю., Огарков А.А. Имитационное моделирование и оптимизация энергопотребления офисного здания // Материалы конференции «ИММОД–2017». 2017. 480–484 с.
4. Шпуров И. Индустрия 4.0 // Эксперт. 2016. № 40(1002). URL: [http://expert.ru/expert/2016/40/#page\\_14](http://expert.ru/expert/2016/40/#page_14) (дата обращения: 06.08.18).
5. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса [сайт]. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 06.08.18).
6. Сервис для облачной аналитики имитационных моделей // AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса [сайт]. URL: <https://www.anylogic.ru/features/cloud/> (дата обращения: 11.09.18).
7. Ильин О.В. Кондуктометрические методы контроля качества сетевой и питательной воды // Энергетика Татарстана. 2014. № 3–4(35–36). С. 89–95.
8. Денисова А.Р., Роженцова Н.В. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2010. 248 с.
9. Погодкин К.Г., Иванов Б.Л., Рудаков А.И. повышение эффективность дезинфекции сельскохозяйственных помещений и оборудования // Агроинженерная наука XXI века: науч. тр. Регион. науч.-практ. конф. 2018. С. 184–189.

УДК 004.415+621.316

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДАТЧИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ «МОНИТОР-К»**

Самат Маратович Тукаев<sup>1</sup>, Рустэм Газизович Хузяшев<sup>2</sup>, Игорь Леонидович Кузьмин<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>samattukaev@mail.ru, <sup>2</sup>142892@mail.ru, <sup>3</sup>to\_kigor@list.ru

В статье описывается алгоритм работы микроконтроллера «STM32F303VC», входящего в состав датчика определения места повреждения волновым методом в разветвленных электрических сетях «Монитор-К». Рассмотрены основные периферийные устройства микроконтроллера, необходимые для оцифровки и обработки аналогового фазного сигнала напряжения.



**Ключевые слова:** программное обеспечение, микроконтроллер, STM32, определение места повреждения, сигнал переходного процесса, аварийный режим, переходной процесс, волновой метод определения места повреждения.

## DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE OF THE TRAVELING-WAVE FAULT LOCATION DEVICE «MONITOR-K»

S.M. Tukaev, R.G. Khuzyashev, I.L. Kuzmin

The article describes the work algorithm of the microcontroller “STM32F303VC”, which is part of the traveling-wave fault location device “Monitor-K” working in treelike electrical networks. The main peripheral devices of the microcontroller, necessary for digitizing and processing the analog voltage phase signal, are considered.

**Keywords:** Software, microcontroller, STM32, fault location, transient signal, emergency mode, transient, traveling-wave fault location.

На сегодняшний день одним из основных векторов развития электрических сетей в России является их цифровизация, т. е. переход к цифровым интеллектуальным сетям, способным к самодиагностике, самостоятельному распределению электрической энергии между потребителями, а также самовосстановлению в случае аварийных ситуаций.

Наибольшее количество аварий происходит в электрических сетях среднего напряжения 6–35 кВ. Вследствие отсутствия эффективных систем мониторинга аварийных процессов в таких сетях, зачастую, определение места повреждения (ОМП) происходит вручную сотрудниками оперативно-выездной бригады электросетевой компании. Существующие устройства ОМП, в большинстве своем, реализуют традиционные импедансные методы расчета расстояния до места повреждения. Однако так как сети среднего напряжения и линии электропередачи (ЛЭП) смешанного типа, состоящие из секций кабельных линий (КЛ) и воздушных линий (ВЛ) электропередачи, имеют разветвленную структуру, традиционные методы обладают большой погрешностью, что не дает возможности самодиагностики электрическим сетям 6–35 кВ. Наиболее перспективным является применение в сетях среднего напряжения устройств ОМП, реализующих волновые методы ОМП (ВОМП), показавшие свою эффективность в сетях напряжением 110 кВ и выше, обладающих линейной структурой.

В настоящее время уже существует комплекс ВОМП в сетях 6–35 кВ, включающий в себя, помимо прочего, датчики «Монитор-К». С результатами опытной эксплуатации комплекса в сетях с ВЛ 10 кВ, находящимися на балансе компании ОАО «Сетевая компания», можно ознакомиться в [1].

Последняя версия датчика «Монитор–К» имеет возможность производить бесперебойный одновременный мониторинг двух фазных шин 10 кВ внутри комплектной трансформаторной подстанции (КТП) 6(10)/0,4 кВ. Для более эффективного ВОМП необходимо усовершенствование датчика до версии, способной вести мониторинг одновременно трех фаз с меньшим периодом дискретизации аналогового сигнала. Предметом данной работы является описание алгоритма работы микроконтроллера (МК) «STM32F303VC», являющимся ключевым элементом в модернизации датчика «Монитор-К».

Компания «STMicroelectronics» производит МК с высокой производительностью, пользующиеся популярностью у производителей электронных приборов. Для модернизации «Монитор-К» был выбран МК «STM32F303VC», имеющий тактовую частоту микропроцессора (МП) 72 МГц, объем оперативной памяти – 40 кБ. Особенностью данного МК является наличие четырех блоков аналого-цифровых преобразователей (АЦП), способных работать параллельно, не требуя вычислительных мощностей МП. Также у МК есть два блока прямого доступа к памяти (ПДП), которые могут работать параллельно, необходимые для передачи данных от периферийных устройств (контактов ввода/вывода, АЦП) до ячеек оперативной памяти (возможны и другие направления передачи данных).

Настройка периферийных устройств МК производилась с помощью функций библиотеки «StandardPeripheralLibrary» (SPL), разработанной компанией «STMicroelectronics». Для создания программного кода использовалась интегрированная среда разработки «KeilVision5». Далее будут рассмотрены ключевые этапы настройки периферийных устройств МК.

Для тактирования МП и периферийных устройств использовался встроенный модуль «ResetandClockControl» (RCC). В МК есть два источника тактирования: внешний, «HighSpeedExternaloscillator» (HSE), и внутренний, «HighSpeedInternaloscillator» (HSI). HSE чаще исполняется в виде кварцевого резонатора, а HSI – в виде RC-генератора, и погрешность HSE, достигающей  $10^{-6}$ , значительно ниже, чем у HSI, равной  $10^{-2}$  [2]. Вследствие этого HSE был выбран в качестве источника тактирования с помощью функции отключения HSI: «RCC\_HSIcmd(DISABLE)». Дополнительными функциями частота модуля тактирования МК была настроена на 72 МГц, к этому модулю были подключены контакты ввода/вывода портов А и В, четыре блока АЦП, два блока ПДП.

Блоки АЦП производят оцифровку аналогового сигнала напряжения, поступившего на контакты ввода/вывода. Для уточнения связей между определенными контактами и необходимыми блоками АЦП, в целях правильной настройки, использовалась документация МК «DS9118» [3]. Блоки АЦП были настроены на непрерывное преобразование сигналов с временем обработки, в течение которого АЦП оцифровывает одну выборку, равным 7,5 тактам, и разрядностью выходных данных, равной 8 бит. При тактовой частоте 72 МГц такой режим позволяет добиться преобразования сигнала с периодом дискретизации, примерно равным 0,4 мкс.

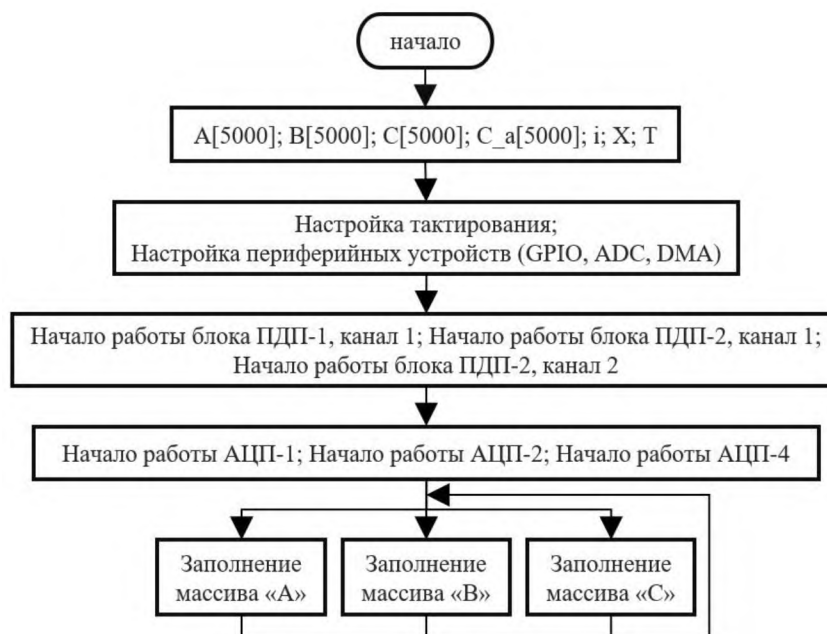
Для отправки данных, полученных в АЦП, в ячейки оперативной памяти использовались три канала ПДП. АЦП-1 был подключен к блоку ПДП-1 через канал № 1; АЦП-2 – к блоку ПДП-2 через канал № 1; АЦП-4 – к блоку ПДП-2 через канал № 2. Два канала одного блока ПДП могут работать только в последовательном режиме, поэтому снятие данных с блоков АЦП, подключенных к ПДП-2, происходило не одновременно, а по очереди, с определенным отставанием канала № 2 от канала № 1. Вследствие очередности отправки данных этими каналами было настроено внешнее прерывание МК по событиям установки флагов заполнения половины и полного количества ячеек в массиве оперативной памяти у канала № 2 блока ПДП-2 функциями «DMA\_ITConfig(DMA2\_Channel2, DMA\_IT\_TC | DMA\_IT\_HT, ENABLE)» и «NVIC\_EnableIRQ(DMA2\_Channel2\_IRQn)», позволяющими прерывать цикл программы в случае заполнения каналом половины или полного количества ячеек в массиве данными, полученными от АЦП-4. При прерывании дополнительными функциями останавливалась работа всех блоков ПДП и, таким образом, массивы всех трех каналов в оперативной памяти оказывались заполненными на одинаковое количество ячеек.

Рассмотрим подробнее алгоритм работы МК, уже реализованный на сегодняшний день (рис. 1).

Данный алгоритм позволяет оцифровывать сигналы напряжения с помощью трех АЦП и передавать данные в ячейки памяти с помощью двух блоков ПДП.

Из рисунка видно, что после определения всех массивов и переменных, настройки периферийных устройств и включения блоков ПДП и АЦП, происходит непрерывное заполнение массивов данными в кольцевом режиме. Размеры массивов «А», «В» и «С», необходимые для того, чтобы

сохранять оцифрованные значения напряжения, взятые с фазных шин внутри КТП, равны 5 кБ, что позволяет, в соответствии с размерностью данных на выходе АЦП, сохранять пять тысяч оцифрованных значений напряжения для каждой фазы. Для реализации ВОМП такого количества данных вполне достаточно.



Упрощенная блок-схема алгоритма работы МК

Массив «C\_a», а также значения «i», «X» и «T» будут необходимы в дальнейшем при реализации алгоритма выявления сигнала переходного процесса и отправки информации на порт GPRS-модуля для ее передачи на удаленный сервер.

### Список литературы

1. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И. Программно-аппаратный комплекс волнового метода определения места повреждения в сетях 6–10 кВ // Междунар. конф. и выставка «РЗА–2017»: матер. конф. СПб.: 2017. С. 1179–1185.
2. STM32L – система тактирования (обзор) // Easy Electronics: Электроника для всех [сайт]. URL: <http://we.easyelectronics.ru/STM32/stm32l-sistema-taktirovaniya-obzor.html> (дата обращения: 13.01.19).
3. STM32F303VC // STMicroelectronics [сайт]. URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f3-series/stm32f303/stm32f303vc.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f3-series/stm32f303/stm32f303vc.html) (дата обращения: 11.09.18).

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QR-КОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Алина Ринатовна Денисова<sup>1</sup>, Денис Павлович Спасов<sup>2</sup>, Алсу Ренатовна Галяутдинова<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>spasovdenis@list.ru, <sup>3</sup>Alsu296@ya.ru

В данной статье рассматривается возможность использования QR-кода в промышленных целях, а именно в снижении амортизационных затрат на эксплуатацию оборудования.

**Ключевые слова:** QR-код, промышленность, оборудование, сканирование, оперативный персонал, информация, единая база, приложение, производство, АСКУЭ, техническое состояние, СОТИАССО.

## **AUTOMATED DIAGNOSTICS OF ELECTRIC EQUIPMENT WITH THE USE OF QUICKRESPONSE CODE FOR ELECTROTECHNICAL SYSTEMS**

A.R. Denisova, D.P. Spasov, A.R. Galyautdinova

This article discusses the possibility of using a QR-code for industrial purposes, namely in reducing the depreciation costs for the operation of equipment.

**Keywords:** the QR code, an industry, the equipment, a scanning, the operating personnel, the information, a common base, an application, the production, the AMR, the technical condition, the SOTIASSO.

В настоящее время положение в мировой энергетике характеризуется некоторыми особенностями, объясняющими повышенное внимание к надежности работы оборудования энергосистем. Развитие свободного рынка электроэнергии привело к усилению конкуренции между компаниями, производящими, передающими и распределяющими электроэнергию. Это, в свою очередь, привело к стремлению любыми средствами повысить рентабельность производства и снизить расходы на эксплуатацию парка оборудования. Для основного оборудования энергосистем прямым последствием этого явилось снижение капитальных вложений в обновление парка оборудования, стремление как можно дольше эксплуатировать уже работающее оборудование.

Одним из решением данной проблемы мы видим использование QR-технологий на производстве. Аббревиатура QR происходит от английских слов «Quick Response» и переводится как «быстрый отклик» или же «быстрое

реагирование» [1]. QR-код представляет из себя двухмерный штрих код, который содержит огромное количество закодированной информации. Наша идея – создать единую базу на основе программного обеспечения (ПО), где будет вся информация о каждом электрооборудовании, включая паспортные и статические данные.

Главное достоинство QR-кода – это быстрая аутентификация любым оборудованием, имеющим возможность сканирования. Что в свое время дает качественно и оперативно получить всю информацию о приборе или об оборудовании, имеющим QR-код. Отсканировать может каждый желающий, имеющий при себе смартфон, в котором есть фотокамера и возможность установки ПО для сканирования.

Предлагаем использовать данную технологию не только для групповых сетей, но и для конечных электроприемников. Установив QR-код на электродвигатель, оперативный персонал при обходе или проверке технического состояния электрооборудования может просканировать его, используя установленное приложение («Молния QR-сканер») на своем телефоне. Для этого он наведет фотокамеру, поймает код в рамке и получит всю информационную базу об электродвигателе (рис. 1). И при обнаружении неисправности электрооборудования оперативный персонал сможет начать диагностировать оборудование, взяв всю необходимую информацию о предыдущей диагностике из единой базы на основе ПО [2].



Рис. 1. Сканирование QR-кода на телефон

Персонал, отвечающий за техническое состояние электрооборудования, должен вести журналы по учету электрооборудования, по техническому осмотру и ремонту оборудования. По данным журналов можно оперативно

отследить, когда было установлено то или иное оборудование, когда оно проходило последнюю проверку, какие мероприятия в процессе нее производились, какие результаты были получены. Однако применив предложенную нами идею, можно ускорить процесс поиска последней информации об электрооборудовании. Что позволит сэкономить время на обследование тех или иных дефектов оборудования.

Дальнейшей ступенью развития идеи может быть внедрение автоматизированной информационно измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ) совместно с единой эксплуатационной базой. Система предназначена для сбора, обработки и хранения результатов измерений количества электрической энергии, выработанной, полученной, потребленной на собственные нужды (СН) и отпущенной потребителям электроэнергии, осуществления контроля над энергопотреблением, регистрации параметров энергопотребления, проведения расчетов в объеме оказываемых услуг.

Усовершенствование предложенной технологии возможно внедрением системы обмена технологической информацией с автоматизированной системой системного оператора (СОТИАССО). СОТИАССО имеет три функциональных уровня:

1. Нижний уровень (уровень процесса) состоит из устройств, обеспечивающих сбор информации по присоединениям. В качестве устройств нижнего уровня расширяемой части системы используются контроллеры присоединений ARISC30х, входящие в состав ПТК АСУ ТП. Источниками технических измерений электрических величин являются измерительные трансформаторы тока и напряжения, источниками дискретной информации – концевые выключатели, ключи и прочее. Измерение электрических величин осуществляется платами прямого ввода контроллеров присоединений ARIS. Для подключения источников информации (датчиков) с унифицированным сигналом тока и напряжения применяется специализированная плата в составе контроллера ARIS.

2. Средний уровень (межуровневое внутрисистемное взаимодействие и взаимодействие АС удаленного диспетчерского центра и ГЩУ/БЩУ вашего предприятия) состоит из устройств, которые выполняют функции сбора и концентрации информации (резервные коммутационные контроллеры ARISCS-H2, коммутаторы, маршрутизаторы), обеспечивающие организацию межуровневых коммутаций без изменения целостности данных, информационный обмен с удаленными диспетчерскими центрами, включая

региональное диспетчерское управление (РДУ), через существующую систему внешней связи по резервным каналам связи или же через новой, если таковой нет на предприятии.

3. Верхний уровень (визуализация и архивирование) состоит из устройств сбора, обработки и архивирования данных (сервер РАС), представления информации пользователем (существующие АРМ). Для подсистемы единого времени в СОТИАССО можно использовать систему обеспечения единого времени (СОЕВ). СОЕВ включает в себя ПО и технические средства, обеспечивающие прием сигналов точного времени от внешнего источника – спутников систем GPS/ГЛОНАСС. СОЕВ поддерживает протокол NTP (SNTP). В качестве сетевого источника единого времени для СОТИАССО используем NTP-серверы, которые обеспечивают точность синхронизации в системе порядка 2–3 мс.



Рис. 2. Логический контроллер

Ядром системы являются программируемые логические контроллеры, такие как ARIS C30x (рис. 2) реального времени промышленного исполнения. Они выполняют следующие функции: самодиагностику, диагностику каналов связи и устройств нижнего уровня, выбор данных с исправного канала или от источника данных при возникновении неисправности на одном из каналов или источнике данных, первичную обработку данных, проставление сигналам признаков качества (достоверности, замещения и др.), синхронизацию времени с GPS или ГЛОНАСС – приемником и проставление сигналам меток единого времени, прием и передачу данных в SCADA–систему, выбор данных для передачи в автоматизированную систему системного оператора и их передачу в ПЛК связи с системным оператором.

При мониторинге силовых трансформаторов, установив датчики на контроль утечки трансформаторного масла, можно синхронизировать сигнал через ПТК, используя верхний уровень управления, для этого можно применить SCADA-систему на ПО «Овация» (рис. 3). Аварийный сигнал будет транслироваться сразу на автоматизированное рабочее место



(АРМ) и дублироваться в единую базу, доступ которой можно получить через QR-код. Следовательно, оперативный персонал сможет начать диагностику на устранение данного дефекта без предварительных оперативных переговоров.

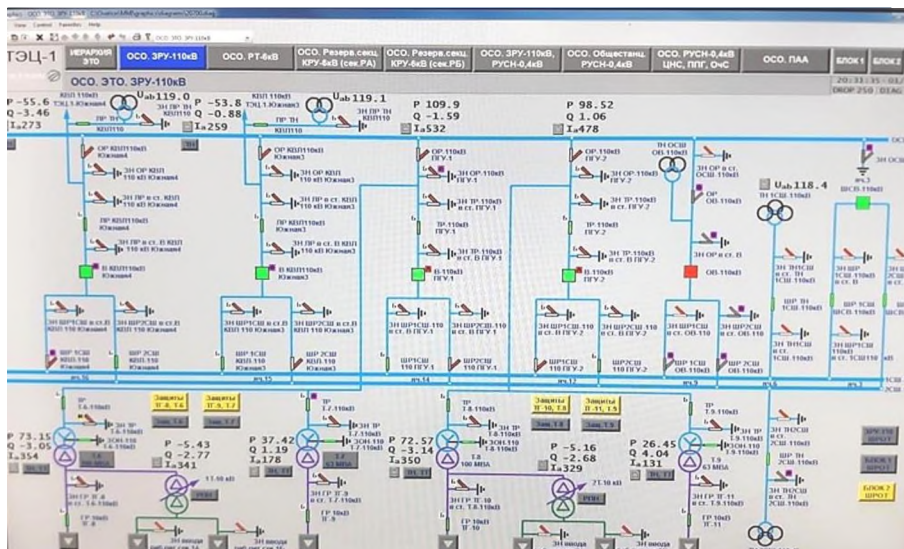


Рис. 3. ПО «Овация»

АРМ – программно-технический комплекс автоматизированной системы, предназначенный для автоматизации деятельности. Оно объединяет программно-аппаратные средства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации и её вывод на монитор, как правило, АРМ (рис. 4) является частью автоматизированной системой управления (АСУ) [4].



Рис. 4. Программно-технический комплекс автоматизированной системы в работе

Таким образом, создание единой эксплуатационной базы на основе ПО, в которой будет находиться и храниться вся информация о том или ином оборудовании на предприятии, сделает производство более эффективным, сэкономит время на обследование тех или иных дефектов оборудования, снизит затраты на эксплуатацию парка оборудования [5].

Внедрение СОТИАССО и АИИСКУЭ обеспечит оптимизацию и автоматизацию системы, а также передачу данных на ГЩУ/БЩУ предприятия и РДУ курирующий ваш регион. Тем самым мы предлагаем вариант модернизации и полной автоматизации системы. Возможность распознавания кодов сканирующим оборудованием сделало QR-код такими популярными не только в рекламе, торговле, логистике, но и на производстве.

### **Список литературы**

1. Самойлова Е. Как работает QR-код: программа, назначение, принцип работы и применение [Электронный ресурс] // ФБ.ру. URL: <http://fb.ru/article/>
2. Роженцова Н.В. Диагностика электрооборудования промышленных предприятий: метод. указания к лаб. раб. Казань, КГЭУ. 2010. 36 с.
3. Иванова В.Р., Фетисов Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. № 9–10. С. 165–169.
4. Погодкин К.Г., Иванов Б.Л., Рудаков А.И. Повышение эффективность дезинфекции сельскохозяйственных помещений и оборудования // Агроинженерная наука XXI века: сб. науч. тр. Региональной науч.-практ. конф. 2018. С. 184–189.
5. Сушков С.Л., Рудаков А.И. Современные способы балансировки однолопастных ветроустановок // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: матер. V Всерос. науч.-техн. конф. (к 50-летнему юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники) / Минобрнауки РФ, ТГУ. Тольятти, 2017. С. 440–445.

## ВЫБОР МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Павел Павлович Павлов<sup>1</sup>, Максим Алексеевич Истоппенников<sup>2</sup>,  
Булат Ирекович Сафиуллин<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>pavlov2510@mail.ru, <sup>2</sup>istoplennikov97@mail.ru, <sup>3</sup>gougle2011@yandex.ru

В 21 веке имеется большое разнообразие транспорта, так как транспорт осуществляет одну из важных функций на планете для человека. Это перевозка как и людей, так и грузов. Одной из перспективных и быстроразвивающихся категорий является электрический транспорт. Создание новых более сложных систем управления позволяет создать более быстрый и, главное, безопасный способ передвижения.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, троллейбус, система управления, микроконтроллер, архитектура, параметры микроконтроллера.

## THE CHOICE OF MICROCONTROLLER FOR ELECTRIC ROLLING STOCK

P.P. Pavlov, M.A. Istoplennikov, B.I. Safiullin

In the 21st century there is a large variety of transport, as transport performs one of the important functions on the planet for humans. This is transportation of both people and goods. One of the promising and fast-developing categories is electric transport. Creating a new more complex control systems allows you to create a faster and more importantly safer way of movement.

**Keywords:** electric transport, trolley bus, control system, microcontroller, architecture, microcontroller parameters.

Электротранспорт – вид транспорта, использующий в качестве источника энергии электричество, а в качестве привода – тяговый электродвигатель. Его основными преимуществами перед транспортом с двигателями внешнего или внутреннего сгорания являются более высокая производительность и экологичность.

Во многих развитых странах электрический транспорт является одним из главных видов транспорта как для перевозки пассажиров, так и для перевозки груза. На его долю приходится примерно 50 % всех этих перевозок. А в развивающихся странах это составляет около 15 %.

Различают грузовой и пассажирский электрический транспорт.

Грузовой электротранспорт является хорошим транспортом для перевозок, который имеет высокий КПД по сравнению с ДВС. Например, грузовые троллейбусы, электровозы и электропоезда переменного и постоянного тока и т. д.

Основными видами городского электротранспорта являются: трамваи, троллейбусы, метрополитен, электробусы, электропоезда.

А также могут применяться фуникулеры, монорельсы и т. п.

Рассмотрим троллейбусы. Троллейбус является одним из наиболее простых и применяемых видом пассажирского электрического транспорта. Его индивидуальность заключается в передвижении по проезжей части движущемуся по определённом маршруту. На этом пути движения монтируются токоведущие провода и ставят на определённых участках тяговые электроподстанции. Троллейбус имеет относительно большую манёвренность (при необходимости может объехать преграду на этой линии, в отличие от железнодорожного).

Одним из видов таких троллейбусов является Тролза-5275.03 «Оптима-2». Эти троллейбусы большой вместимости для внутригородских пассажирских перевозок. Максимальная допустимая масса – 17 360 кг, максимальная допустимая нагрузка на оси – 6 910; 10 450 кгс. Пассажироместимость – 100 человек, а сидячих мест – 27. Из 60 % выпущенной продукции наибольшая часть была поставлена в Казань, она составляет 18 %, в Москву – 15 %, Саратов, Саранск, Волгоград и Новосибирск – по 6 %, Душанбе – 5 %.

В городе Казань троллейбус Тролза-5275.03 «Оптима-2» является основным: 140 единиц из 173. В данной модели троллейбуса есть одно из главных качеств – автономный ход, он позволяет объезжать различные препятствия по пути. Также имеется обогрев боковых зеркал, жидкокристаллический дисплей, матричные светодиодные индикаторы в салоне и снаружи, датчики температуры пассажирского салона, двигателя и других устройств троллейбуса, температура которых требуется в постоянном контроле. Для этого всего используются различные системы автоматики, основанные на реле, автоматах и полупроводниковых преобразователях. Главным органом любой современной системы автоматики является микропроцессорное или микроконтроллерное устройство.

При разработке микропроцессорной или микроконтроллерной автоматики, систему пользовательского интерфейса и систему управления выполняют два разных микропроцессора [1]. Сделано это по причине того, что современный пользовательский интерфейс занимает большой объем памяти и большую часть времени работы микроконтроллера, что в системах, от которых требуется быстрая реакция, не допустимо.

В троллейбусах Тролза-5275.03 «Оптим-2» для управления асинхронным электродвигателем используется преобразователь ПТАД-202М-180. Данное устройство управляет асинхронным электродвигателем за счет изменения частоты питающего напряжения, реализованного на IGBT транзисторах.

Данными IGBT транзисторами управляет микропроцессор XE167, который также получает информацию с датчиков максимального тока, датчиков сетевого напряжения, напряжения сети собственных нужд и напряжения сети низковольтных потребителей электроэнергии (приводы закрытия дверей, вентиляторы). Управление силовыми транзисторами осуществляется программно посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), имеющие разрядность 16 бит. Программная реализация обусловлена наличием всего двух задающих регистров таймеров, которые поочередно подают ШИМ сигнал на драйверы транзисторов. По сути ШИМ сигнал подается с генератора на вход дешифратора, выходы которого являются выходами микропроцессора. Аналогичным образом устроено устройство аналого-цифрового преобразования, где каждые входы обозначенные как аналоговые и подключены к шифратору, выход которого подключен к входу к входу аналого-цифрового преобразователя. Выше перечисленная система имеет главный недостаток – невозможность построения многопоточного приема или передачи сигнала, где считывание и передача осуществляется абсолютно одновременно.

Современные микроконтроллеры архитектуры ARM (Advanced RISC Machine) Cortex-M (высокопроизводительные микроконтроллеры) и Cortex-A (системы жесткого реального времени) 32-битной системы, позволяют решить проблему многопоточности. Микроконтроллеры архитектуры Cortex-A не будут рассмотрены, так как они используются в системах, где требуется время реакции системы в несколько единиц микросекунд.

Главным преимуществом архитектуры ARM является использование команд усовершенствованного RISC – reduced instruction set computer (компьютер с набором коротких команд). Данная архитектура за счет сокращения инструкций позволила увеличить частоту процессора и создать многопоточковые программы управления.

Для сравнения с микропроцессором XE167 был выбран микроконтроллер STM32f407 (микроконтроллер архитектуры ARM Cortex-M4), так как в первую очередь розничная цена данных микроконтроллеров

является одинаковой и составляет в среднем по России 20 USD. Список параметров, по которым сравниваются данные микроконтроллеры, представлены в табл. 1.

Сравнение по данным характеристикам [3, 4] обоснованно тем, что именно от этих параметров зависит скорость и качество обработки входных сигналов, а также максимальный объем и скорость выполнения программ, так как данные качества требуются от микроконтроллеров в системах автоматизации. По данному сравнению можно сделать вывод, что 32-битный микроконтроллер STM32f407 является более лучшим вариантом, чем 16-битный микропроцессор XE167.

Таблица 1

Параметры микроконтроллеров XE167 и STM32f407

| Сравниваемый параметр                                                             | XE167 | STM32f407 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| Максимальная частота тактирования процессора, МГц                                 | 80    | 168       |
| Количество АЦП/разрядность, бит                                                   | 2/10  | 3/16      |
| Количество независимых генераторов ШИМ разрядностью 16 бит                        | 2     | 8         |
| Количество аппаратных входов внешних прерываний (interruptpins)/время реакции, нс | 16/12 | 136/11    |
| Объем памяти программы (Flashmemory), кбайт                                       | 768   | 1024      |
| Объем оперативной памяти (SRAM), кбайт                                            | 64    | 196       |

Сравнение по данным характеристикам [3, 4] обоснованно тем, что именно от этих параметров зависит скорость и качество обработки входных сигналов, а также максимальный объем и скорость выполнения программ, так как данные качества требуются от микроконтроллеров в системах автоматизации. По данному сравнению можно сделать вывод, что 32-битный микроконтроллер STM32f407 является более лучшим вариантом, чем 16-ти битный микропроцессор XE167.

Помимо аппаратных характеристик также стоит обращать внимание на поддерживаемость архитектуры разработчиками компиляторов и языков программирования. Основной показатель поддерживаемости архитектуры – лицензия, по которой распространяется производство. Контроллеры ARM Cortex распространяются по открытой лицензии, означающей, что любая компания может производить свои микроконтроллеры данной архитектуры. Помимо того, что это положительно влияет на цену

микроконтроллеров, это также влияет на качество программного обеспечения. Ведущие производители в данной сфере такие как STMicroelectronics, TexasInstruments, Atmel, Intel помимо производства микроконтроллеров занимаются также разработкой и улучшением программного обеспечения для микроконтроллеров. Данные выводы сделаны на основе анализа рынка микроконтроллеров [2] в период с 2012 по 2017 гг. (табл. 2).

Таблица 2

Объем рынка микроконтроллеров, млн долл.

| Устройства             | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | CAGR* |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Полупроводники в целом | 325 367 | 339 666 | 361 612 | 385 052 | 395 974 | 413 602 | 4,9%  |
| Микроконтроллеры (МК)  | 16 008  | 16 202  | 17 211  | 18 799  | 19 307  | 20 480  | 5,1%  |
| 4-разрядные МК         | 154     | 159     | 161     | 157     | 145     | 133     | -2,8% |
| 8-разрядные МК         | 6 057   | 6 565   | 6 936   | 7 532   | 7 768   | 8 259   | 6,4%  |
| 16-разрядные МК        | 4 021   | 3 611   | 3 765   | 4 060   | 4 053   | 4 019   | 0,0%  |
| 32-разрядные МК        | 5 776   | 5 868   | 6 349   | 7 050   | 7 341   | 8 069   | 6,9%  |

Примечание. \* CAGR (Compound Annual Growth Rate) – совокупный среднегодовой темп роста.

При разработке электроподвижного состава и дальнейшем выборе микроконтроллера помимо аппаратных характеристик, которые задаются характеристиками ЭПС, также стоит учитывать поддерживаемость архитектуры, так как ошибки и недочеты в ПО быстро устраняются ввиду высокой конкуренции на рынке, что приводит к дальнейшему улучшению качества системы управления в целом.

### Список литературы

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: учеб. для вузов / под ред. О.П. Глудкина. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 768 с.
2. Эйленд А. Выбор микроконтроллера – 8- или 32-разрядный? // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 5. С. 74–76.
3. Infineon Technologies AG, XE167 16-Bit Single-Chip Real Time Signal Controller // Infineon.com 2008. URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XE167X-DS-v02\\_01-en.pdf?fileId=db3a3043156fd5730116100ef1b41b52](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XE167X-DS-v02_01-en.pdf?fileId=db3a3043156fd5730116100ef1b41b52) (дата обращения: 11.02.19).

4. STMicroelectronics N.V. RM0090 Reference manual // STMicroelectronics [site]. URL: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf) (дата обращения: 11.02.19).

УДК 621.313.001.63

## **ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ МНОГООБМОТОЧНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Ирина Сергеевна Снитко<sup>1</sup>, Павел Сергеевич Пилипенко<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «ИГЭУ», г. Иваново

<sup>1</sup>irant-kin@yandex.ru, <sup>2</sup>pavel.pilipenko2012@yandex.ru

При анализе симметричных трехфазных цепей синусоидального тока уравнение связи между комплексными фазными напряжением и током в обмотках трансформатора представляются в виде закона Ома, при этом значение комплексного сопротивления всех фаз номинального режима можно определить по паспортным данным трансформатора. При нарушении симметрии напряжения и токи ветвей трансформатора будут связаны матричными уравнениями. При этом определение элементов матрицы комплексных сопротивлений ветвей трансформатора становится проблематичным и может быть произведено только с учетом параметров магнитной системы. Это является одной из причин применения метода симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов цепей с силовыми трансформаторами. Однако этот метод применим только для линейных систем. В основе исследований положен символический метод анализа разветвленных электрических и нелинейных магнитных цепей с использованием понятия комплексной магнитной проницаемости и матричных методов, основанных на полных трехфазных схемах замещения сетевых объектов.

**Ключевые слова:** символический метод, силовой трансформатор, несимметричный режим, анализ цепей, магнитная цепь, комплексная магнитная проницаемость.

## **APPLICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF NON-SYMMETRIC MODES OF MULTI-WAVE POWER TRANSFORMERS**

I.S. Snitko, P.S. Pilipenko

When analyzing symmetrical three-phase circuits of a sinusoidal current, the equation of the connection between complex phase voltages and current in the transformer windings is represented as Ohm's law, while the value of the complex resistance of all phases of the nominal mode can be determined from the transformer's passport data. In the case of symmetry breaking, the voltages and currents of the branches of the transformer will be



## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Герасименко А.А., Пузырев Е.В.</i> Программный модуль «VES» комбинированного расчета потерь электрической энергии программы «POTERIV1.1: SETI, Reg10PVT» .....                              | 3  |
| <i>Проничев А.В., Солдусова Е.О., Шишков Е.М.</i> Об анализе электрического режима внутрифазного короткого замыкания для разомкнутых линий электропередачи с продольной самокомпенсацией ..... | 8  |
| <i>Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Семенова О.Д.</i> Анализ основных элементов интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью .....                                | 12 |
| <i>Крылова М.В.</i> Исследование режимов распределительных электрических сетей 10 кВ с целью определения мест повреждения .....                                                                | 16 |
| <i>Губаев Д.Ф., Губаева О.Г.</i> Феррорезонансные явления в распределительных устройствах .....                                                                                                | 20 |
| <i>Мазнева О.В., Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л.</i> Классификация сигналов переходного процесса с использованием корреляционного анализа .....                                                     | 25 |
| <i>Тарасов В.А., Тарасова В.В., Калинин А.Г., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г.</i> Оптимизация режимов отопления зданий и сооружений методом адаптивного управления .....                          | 29 |
| <i>Роженцова Н.В., Галяутдинова А.Р.</i> Анализ повреждаемости силовых трансформаторов .....                                                                                                   | 35 |
| <i>Белова Т.Д., Грешных Д.А.</i> Анализ применения Unreal Engine 4 для проектирования основного оборудования ГЭС .....                                                                         | 39 |
| <i>Кудрин Б.И.</i> О месте электрики в ряду наук об электричестве .....                                                                                                                        | 44 |
| <i>Володарский М.В., Дюдяков А.А.</i> Расчет потерь на корону для стандартных сечений ВЛ-110, 220 кВ .....                                                                                     | 46 |
| <i>Дорохов Д.А.</i> Использование ОПН для ограничения дуговых перенапряжений .....                                                                                                             | 51 |
| <i>Козлова Е.С.</i> О нутационных колебаниях двухосного гиросtabilизатора на высокоманевренном объекте.....                                                                                    | 56 |
| <i>Костин В.Н., Сериков В.А.</i> Качество напряжения питающей сети в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой .....                                                                    | 62 |
| <i>Соколов А.П., Газизова О.В.</i> Распределение реактивных мощностей нагрузки на генераторном напряжении промышленных электростанций .....                                                    | 67 |

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Рудаков А.И., Спиридонов Р.Р.</i> Использование территорий регламентированных охранных зон линий электропередач .....                                                          | 72  |
| <i>Денисова А.Р., Самигуллина Ю.Б., Аманова Г.А.</i> Перспективы замены воздушных линий электропередачи на кабельные в арктической зоне, способы их прокладки и эксплуатации..... | 77  |
| <i>Гвоздев Д.Б., Архангельский О.Д.</i> Методические подходы к оценке рисков в сложных электроэнергетических системах .....                                                       | 81  |
| <i>Вахнина В.В., Самолина О.В.</i> Особенности функционирования систем электроснабжения при протекании квазипостоянных токов .....                                                | 85  |
| <i>Тропин А.А., Паскарь И.Н.</i> О возможности нормирования электроэнергии электростанции .....                                                                                   | 89  |
| <i>Фролова М.В., Паскарь И.Н.</i> Интервальное оценивание техноценоза Кемеровской области по параметру потребления энергии.....                                                   | 93  |
| <i>Афонина Н.К.</i> Сравнительный анализ тепловых и полупроводниковых источников света .....                                                                                      | 97  |
| <i>Токарев Л.Н.</i> Математическое моделирование процессов в судовых электроэнергетических системах .....                                                                         | 101 |
| <i>Бахтияров М.М., Роженица Н.В.</i> Диагностика кабельных линий.....                                                                                                             | 110 |
| <i>Литвиненко Р.С., Спургис В.С.</i> Пропускная способность городской электротранспортной системы с учетом надежности ее инфраструктуры...                                        | 114 |
| <i>Самойленко Г.Р., Сенько В.В.</i> Оценка допустимых режимов сложных электроэнергетических систем .....                                                                          | 125 |
| <i>Сидоров А.Е., Галиев А.Ф.</i> Оптимизация распределительных сетей электрической энергии при модернизации существующих .....                                                    | 130 |

## **Секция 2. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г., Баширов Р.А.</i> Перспективы развития электромагнитного акустического метода контроля сталей и сплавов .....             | 134 |
| <i>Солдусова Е.О., Проничев А.В., Казанцев А.А.</i> Исследование режимов при использовании новейших конструкций трансформаторов в городских электросетях..... | 138 |
| <i>Булычева Е.А., Куликов А.И., Янченко С.А.</i> Определение фактического вклада многоквартирного дома в несинусоидальность напряжения сети ..                | 143 |

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Сандаков В.Д.</i> Определение оптимальных энергетических характеристик процесса очистки воздуха от CO <sub>2</sub> замкнутых помещений.....                          | 150 |
| <i>Хабибрахманов Н.И., Денисова Н.В.</i> Повышение энергетической эффективности систем освещения.....                                                                   | 153 |
| <i>Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.</i> Мониторинг теплового режима изоляционных материалов силовых кабелей .....                                                           | 159 |
| <i>Фетисов Л.В., Булатов О.А.</i> Расчет экономической эффективности после установки вольтодобавочного трансформатора в распределительных сетях низкого напряжения..... | 165 |
| <i>Кривошеева А.А.</i> Оценки использования различных ценовых категорий на электроэнергию .....                                                                         | 170 |
| <i>Меренцев Д.О., Паскарь И.Н.</i> Прогнозирование электропотребления химического предприятия .....                                                                     | 174 |
| <i>Малафеев А.В., Шетилова О.Е.</i> Способ учета вклада потребителей сетевой организации в потери мощности для оценки нормативных потерь.....                           | 179 |
| <i>Фетисов Л.В., Нуриев Р.Ф.</i> Прогнозирование и оценка качества функционирования низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях.....            | 182 |
| <i>Зубков С.Д., Коваленко И.В.</i> Модель отказов по причине человеческого фактора .....                                                                                | 185 |
| <i>Timerbaev N.F., Asaad K.A.</i> Numerical study on the double pipe heat exchanger improving by longitudinal fin.....                                                  | 191 |
| <i>Галиева Т.Г., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Ярославский Д.А.</i> Исследование методов и средств диагностики состояния линий электропередачи .....                       | 197 |
| <i>Фетисов Л.В., Аманова Г.А.</i> Перспективы использования распределенной генерации .....                                                                              | 202 |
| <i>Грищук Д.В., Венюков М.В., Хизбуллин Р.Н.</i> Энергосбережение на предприятиях городского электрического транспорта .....                                            | 206 |
| <i>Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г., Биткулов Р.Д.</i> Применение метода динамической идентификации для оценки технического состояния металла электрооборудования .....  | 209 |

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Хисматуллин А.С., Дервянко Н.А., Мавлекаев Е.Ю., Солдатова Е.Г.</i>                                                                                                                               |     |
| Улучшение системы охлаждения масляных трансформаторов .....                                                                                                                                          | 215 |
| <i>Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г., Переверзев А.И.</i> Оценка снижения риска аварий на объектах нефтегазового комплекса при использовании электромагнитно-акустического метода.....                 | 218 |
| <i>Логинов К.В., Ударатин А.В.</i> Установка FACTS в объединенной энергетической системе центра .....                                                                                                | 223 |
| <i>Николаева Е.К., Юдина Н.А.</i> Вероятные риски развития цифровой экономики .....                                                                                                                  | 227 |
| <i>Денисова А.Р., Хайруллина Д.Р.</i> Исследование воздействия синего света..                                                                                                                        | 232 |
| <i>Иванова В.Р., Юдин А.В., Илинбаев А.А.</i> Перспективные электротехнологии .....                                                                                                                  | 236 |
| <i>Платонов Д.Ю., Голубева Н.Д., Степанов В.П.</i> Уточнение расчетных потерь электроэнергии в сетях, питающих краны речных портов .....                                                             | 240 |
| <i>Иванов Д.А., Потанин А.А., Арсланов А.Д.</i> Разработка портативного устройства визуального контроля высоковольтного оборудования.....                                                            | 245 |
| <i>Денисова А.Р., Николаева О.Л.</i> Анализ интеграции стационарной виброметрической системы диагностирования роторного оборудования в линии рафинера хвойного потока бумагоделательной машины ..... | 251 |

### **Секция 3. ЭНЕРГОСИЛОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ**

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Еланский А.Ю., Титоренко К.В., Лабунский Л.С.</i> Моделирование многопульсовых выпрямительных агрегатов .....                                                                 | 257 |
| <i>Долгушев Е.Ю.</i> Использование интеллектуальной релейной защиты электроэнергетических систем для повышения энергосбережения .....                                            | 261 |
| <i>Москалева К.А., Паскарь И.Н.</i> Мультиагентные системы в электроэнергетике .....                                                                                             | 266 |
| <i>Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г.</i> Интеллектуальная система управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов с электрическим приводом ..... | 270 |
| <i>Семина И.А., Кожмендина И.С., Ильенко Д.П.</i> Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования силовых трансформаторов АО «ТГК-11» Омская ТЭЦ .....    | 276 |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Гараев И.З., Иванова В.Р.</i> Исследование работоспособности асинхронных электродвигателей совместно с преобразователем частоты.....                                                        | 283 |
| <i>Калентионок Е.В., Богуславский С.И., Романович С.М.</i> Рациональный подход к автоматизации распределительных электрических сетей .....                                                     | 286 |
| <i>Карачёв А.С., Паскарь И.Н.</i> Прогнозирование электропотребления ООО «Завод Электромашина» .....                                                                                           | 292 |
| <i>Роженцова Н.В., Купоросов А.В.</i> Применение BIM технологии в проектировании и эксплуатации объектов электроэнергетики.....                                                                | 297 |
| <i>Левин В.М.</i> Управление ремонтами оборудования в системах электро-снабжения нефтепромыслов.....                                                                                           | 300 |
| <i>Фетисов Л.В., Маврин Д.Г.</i> Применение логических контроллеров для избавления от чувствительной части сигнализирующих систем.....                                                         | 305 |
| <i>Роженцова Н.В., Регир О.С.</i> Агентное моделирование электрохозяйства потребителя.....                                                                                                     | 310 |
| <i>Тукаев С.М., Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л.</i> Разработка программного обеспечения датчика определения места повреждения волновым методом «Монитор-К».....                                     | 315 |
| <i>Денисова А.Р., Спасов Д.П., Галяутдинова А.Р.</i> Автоматизированная диагностика электрооборудования с использованием QR-кода для электротехнических систем .....                           | 320 |
| <i>Павлов П.П., Сафиуллин Б.И., Истомленников М.А.</i> Выбор микро-контроллера для электроподвижного состава.....                                                                              | 326 |
| <i>Снитко И.С., Пилипенко П.С.</i> Применение математической модели несимметричных режимов многообмоточных силовых трансформаторов.....                                                        | 331 |
| <i>Чубаров К.М., Сенько В.В.</i> Применение стартовых алгоритмов для решения уравнений предельных режимов в задачах оценки устойчивости электроэнергетических систем.....                      | 334 |
| <i>Черник К.Н., Кузин В.И.</i> Система автоматизированного лабораторного эксперимента по исследованию динамических характеристик при различных способах пуска асинхронного электропривода..... | 340 |
| <i>Денисова Н.В., Абсатаров Д.А.</i> Применение технических и программ-ных продуктов компании Schneider Electric для создания «умной» среды.....                                               | 345 |
| <i>Варенов А.А.</i> Программная среда MatLab для эскизного проектирования системы стабилизации повышенной частоты .....                                                                        | 351 |

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Афонин В.И., Андрианов Д.П., Бадалян Н.П. Резонансные явления в двигателях привода лифтов.....</i>                                                                                                                              | 356 |
| <i>Соловьева С.И., Корольков А.Ю., Павлов П.П. Улучшение вспомогательного электропривода высокоскоростного электроподвижного состава .....</i>                                                                                     | 362 |
| <i>Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Исследование влияния электропривода размоточного аппарата стана по производству проволоочной арматуры на ее качество.....</i>                                                                        | 366 |
| <i>Павлов П.П., Сидорова А.А., Мукимов А.Х. Тяговые аккумуляторные батареи щелочного и кислотного типа .....</i>                                                                                                                   | 371 |
| <i>Быкова Н.Д., Сбитнев С.А. Особенности работы трансформатора в линейном режиме .....</i>                                                                                                                                         | 375 |
| <i>Минбаев Э.И., Иванов Д.И. Применение автоматизированных систем и систем диспетчеризации на промышленных объектах и комплексных объектах ЖКХ .....</i>                                                                           | 378 |
| <i>Нгуен Тиен. Тепловой CFD-расчет силового трансформатора ТМ-160/10 .....</i>                                                                                                                                                     | 383 |
| <i>Роженцова Н.В., Пятникова М.В. Внедрение цифровых трансформаторных подстанций .....</i>                                                                                                                                         | 387 |
| <i>Бузаева Е.К., Вильданов Р.Г., Деревянко Н.А., Ширококов Е.Д. Повышение качества электроэнергии, как следствие внедрения быстродействующего автоматического включения резерва.....</i>                                           | 391 |
| <i>Лобов Б.Н., Перегудов О.А. Оптимизация параметров вентильно-индукторного двигателя привода веретена .....</i>                                                                                                                   | 396 |
| <i>Лобов Р.Б. Автоматизация выбора технических решений при построении алгоритмов управления системами водоснабжения и водоотведения....</i>                                                                                        | 403 |
| <i>Вахнина В.В., Дайнеко А.В. Анализ искажения синусоидальной формы кривой напряжения силового трансформатора при насыщении стали магнитопровода и при работе силового трансформатора на трехфазный мостовой выпрямитель .....</i> | 412 |
| <i>Иванов Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Арсланов А.Д. Разработка портативного комплекса для дистанционного контроля высоковольтных изоляторов с использованием беспроводного модуля сбора и передачи данных .....</i>              | 416 |
| <i>Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Абсатаров И.Х. Оценка технического состояния электроприводов на основе анализа параметров гармоник токов и напряжений двигателей .....</i>                                                        | 421 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Варенов А.А., Нафикова А.А.</i> Использование компонентов системы автоматизированного проектирования при разработке регулирующего аппарата..... | 426 |
| <i>Ячина Н.О., Мулюкин К.Н., Матвеев А.М.</i> Об аварийности турбогенераторов Казанской ТЭЦ-1 .....                                                | 432 |

#### **Секция 4. МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Зиновьев В.В., Бартенев О.А.</i> Влияние неоднородного освещения солнечных модулей на выработку мощности .....                                                      | 437 |
| <i>Шириев Р.Р., Садыков М.Ф.</i> Экспертная оценка технических параметров энергосберегающих световых приборов.....                                                     | 444 |
| <i>Белей В.Ф., Задорожный А.О.</i> Тренды мировой и российской ветроэнергетики .....                                                                                   | 450 |
| <i>Давлатов А.М., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю., Султонов О.О.</i> Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанции Республики Таджикистан .....             | 456 |
| <i>Скорикова Е.М., Галушак В.С., Сошинов А.Г., Брагин А.Ю.</i> Головной образец бытового ветроагрегата с управляемым воздушным потоком ..                              | 461 |
| <i>Долгопол Т.Л., Сичевский А.С.</i> Использование автономных гибридных энергоустановок в системах электроснабжения удаленных поселков Дальнего Востока .....          | 465 |
| <i>Юдин А.В., Иванова В.Р., Илинбаев А.А.</i> Актуальность применения систем слежения за солнцем на территории Нижнего Новгорода.....                                  | 469 |
| <i>Шмыков А.Д., Мулюкин К.Н.</i> Холодный синтез как альтернатива современной энергетики.....                                                                          | 473 |
| <i>Гильманова Г.Р., Иванова В.Р.</i> О выборе установки ветроэлектростанций на территории Республики Татарстан для эффективного и безопасного их функционирования..... | 479 |
| <i>Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г., Вахитова А.Р.</i> Повышение надежности электроснабжения удаленных электропотребителей.....                          | 483 |
| <i>Рындин И.А., Абеуов Р.Б.</i> Адаптивная делительная автоматика по частоте и напряжению для энергорайонов с объектами распределенной генерации .....                 | 488 |

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Трутнева Е.В.</i> Применение накопителей энергии для увеличения надежности системы электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии.....                                                                                     | 494 |
| <i>Павленко Д.Д., Буланович Д.И., Полуянович Н.К., Костюков В.А.</i> Разработка электромеханической схемы управления комплексной силовой энергетической установки на базе вертикально-осевой вихревой ветроэнергетической установки ..... | 497 |
| <i>Павлов П.П., Сидорова А.А., Мукимов А.Х.</i> Методы подзаряда аккумуляторных батарей .....                                                                                                                                             | 502 |
| <i>Лукьянов С.И., Мартынов К.С.</i> Устройство регулирования уровня жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ. ....                                                                                                                          | 507 |
| <i>Зайнутдинова Л.Х., Зайнутдинов Р.А., Ключарев А.Ю.</i> Организационно-педагогические условия подготовки кадров для возобновляемой энергетики в астраханском государственном университете .....                                         | 509 |



*Научное издание*

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Материалы  
Всероссийской научно-практической конференции

20–21 марта 2019 г.

Редактор Е.С. Дремичева  
Компьютерная верстка И.В. Краснова  
Дизайн обложки Ю.Ф. Мухаметшина

Подписано в печать 30.04.2019.  
Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Усл. печ. л. 30,4. Уч.-изд. л. 16,9. Тираж 60. Заказ № 5159.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

Казанский государственный энергетический университет в 2018 году отметил свой полувековой юбилей. За время своего существования университет превратился в крупнейший научно-образовательный центр Поволжья и Урала, признанный как в России, так и в международном пространстве. Гордость университета это выпускники – целая плеяда талантливых инженеров, многие из которых стали руководителями ведущих предприятий Татарстана и России, внесли огромный вклад в развитие экономики не только в нашей стране, но и за рубежом. Весьма символично, что в год 50-летия из стен ВУЗа вышел 50 тысячный выпускник.

В КГЭУ действуют Технопарк, Инжиниринговый центр «Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения», Центр компетенций и технологии в области энергосбережения; Молодежный инновационный центр, Молодежный бизнес-инкубатор, научно-образовательный центр «Компьютерные тренажеры в тепло- и электроэнергетике»; научно-технические центры и учебные классы компаний: SchneiderElectric, Bosch, Danfoss, IEK, Эван, Акку-Фертриб, Московский завод тепловой автоматики. На базе КГЭУ созданы не имеющие аналогов в России учебно-исследовательские полигоны «Подстанция 110/10 кВ» и «Распределительные сети 0,4-10 кВ».

Ученые КГЭУ занимают ведущие позиции в области электро- и теплоэнергетики, цифровых технологий, защиты окружающей среды и водных биоресурсов. Университет является участником ряда технологических платформ России. По объему и уровню выполняемых научных работ КГЭУ сегодня является наиболее динамично развивающимся вузом России.

**Сегодня в КГЭУ работают над технологиями, которые изменят будущее!**

