

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**№ 3**

**Нижний Новгород 2019**

**УДК 621.3**  
**ББК 31.2**

**Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. № 3 (7). – 128 с.**

*Выходит 4 раза в год*

**Главный редактор А.Б. Лоскутов**

**зам. гл. редактора**

Андрей Борисович Дарьенков    канд. техн. наук, доцент  
Елена Николаевна Соснина    д-р техн. наук, проф.

**отв. секретарь**

Андрей Владимирович Шалухо    канд. техн. наук

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова    канд. филос. наук, доцент

**гл. редактор выпуска**

Иван Алексеевич Липужин    канд. техн. наук

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

**Учредитель:**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

*Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>*

**ISSN 2658-6754**

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>Яблоков А.А., Филатова Г.А., Петров А.Е.</b> Исследования функции определения места повреждения в составе информационной системы.	4
<b>Карпов И.П., Демидов С.В.</b> Способы диагностики контактной сети переменного тока в послесаварийных ситуациях .....	14
<b>Погорелов А.В.</b> Исследование частотных характеристик рудничной сети с пассивными фильтрокомпенсирующими устройствами .....	27
<b>Умяров Д.В.</b> Обеспечение электромагнитной совместимости электроприемников в энергетических системах судов с электродвижением на этапе проектирования .....	36
<b>Герман Л.А., Серебряков А.С., Осокин В.Л.</b> Способ регулирования напряжения на подстанции при одностороннем питании сети переменного тока с нерегулируемой установкой компенсации реактивной мощности .....	49
<b>Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В.</b> Пути решения проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода в металлургической промышленности .....	60
<b>Крысанов В.Н., Бурковский В.Л., Данилов А.Д.</b> Расширение функциональных возможностей статических устройств регулирования напряжения ЛЭП .....	75
<b>Калинин Е.В., Чивенков А.И.</b> Исследование нормальной составляющей магнитного потока в стыках шихтованных сердечников.....	86
<b>Маслеева О.В., Эрдили Н.И.</b> Экономический анализ энергетической составляющей жизненного цикла возобновляемых источников энергии .....	102
<b>СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА .....</b>	<b>111</b>
<b>Ильин М.В., Гуляев И.В., Briz del Blanco F., Вилков Е.А.</b> Использование нелинейных элементов в тепловой модели для прогнозирования взаимного теплового влияния силовых кристаллов IGBT-модуля .....	111
<b>Наши авторы .....</b>	<b>123</b>

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

УДК 621.316.925

А.А. Яблоков, Г.А. Филатова, А.Е. Петров

### ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ивановский государственный энергетический университет  
им. В.И. Ленина

Предложена концепция информационной системы (ИС), подключаемой к цифровым трансформаторам тока и напряжения, реализующей, в том числе, функцию дистанционного определения места повреждения (ДОМП). Приведены результаты исследования способа ДОМП на компьютерных имитационных моделях, а также результаты исследования макета ИС на комплексе моделирования RTDS. Разработка автоматического ДОМП актуальна, поскольку существующие методы ДОМП часто не обеспечивают требуемую точность и оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов. Инновационные цифровые малогабаритные трансформаторы тока и напряжения при установке их непосредственно на опоре линий электропередач (ЛЭП) позволяют осуществлять замер электрических величин в нормальном и аварийном режиме в промежуточных точках электрической сети, например, на границе балансовой принадлежности.

**Ключевые слова:** информационная система, определение места повреждения, цифровые измерительные трансформаторы.

#### 1. Введение

Концепция Smart Grid предполагает совмещение релейной защиты с информационно-измерительными функциями [1]. Развитие микропроцессорной техники открыло возможность применения новых измерительных преобразователей тока и напряжения. К таким преобразователям относятся: пояс Роговского, магнитотранзисторный преобразователь, резистивный делитель и др. Инновационные преобразователи обладают высокой точностью измерения (погрешность не более 0,1 % по току и напряжению); широким частотным диапазоном измерений, в том числе, возможностью из-

мерения постоянного тока; отсутствием насыщения от токов КЗ и апериодической составляющей [2, 3].

Нетрадиционные первичные преобразователи совместно с устройствами оцифровки и передачи сигнала получили название «цифровые трансформаторы». Использование нетрадиционных первичных преобразователей требует разработки новых методов и алгоритмов релейной защиты и автоматики, в том числе – алгоритмов автоматического дистанционного определения мест повреждений (ДОМП). Последние должны учитывать особенности данных первичных преобразователей и цифровых трансформаторов тока и напряжения в целом (например, возможности использования производных первичных величин, первичной обработки данных непосредственно в блоках цифрового трансформатора, использование новых характеристик дифференциальных защит и т.д.)

Разработка автоматического ДОМП по-прежнему является актуальной задачей, поскольку существующие методы ДОМП зачастую не обеспечивают требуемую точность (например, из-за погрешностей первичных преобразователей), оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов [4-7]. Актуальной задачей является разработка методов ДОМП на линиях с односторонним питанием. Применяемые ныне методы одностороннего ДОМП, имеют, как правило, низкую точность и существенную зависимость от величины переходного сопротивления [8].

## **II. Предлагаемое решение**

Низкие массогабаритные показатели цифровых трансформаторов с нетрадиционными первичными преобразователями тока и напряжения делают возможным монтаж измерительных устройств (информационной системы (ИС) с функциями ДОМП) на анкерных опорах линий электропередач (ЛЭП) без необходимости установки дополнительных монтажных конструкций. Установка ИС в промежуточных точках сети позволяет повысить наблюдаемость сети, а также организовать замер электрических величин не только на магистральных ЛЭП, но и на ответвлениях, что повышает точность ДОМП и устраняет «зоны неопределенности» при одностороннем замере.

В составе ИС разработан алгоритм ДОМП, осуществляющий односторонний замер расстояния до места повреждения (КЗ) по параметрам аварийного режима. Предложенный способ ДОМП предполагает использование сигналов с нетрадиционных датчиков тока и напряжения, в том числе, производных токов с поясов Роговского, входящих в состав цифровых трансформаторов.

### III. Алгоритм ДОМП

Разработанный алгоритм определения места повреждения основан на одностороннем замере мгновенных значений производной тока и мгновенных значений напряжения в моменты перехода тока через нулевые значения [4, 9]. Способ отличается от аналогов физическим измерением производной тока при помощи пояса Роговского (одного из первичных преобразователей тока цифрового трансформатора). В качестве датчика тока, по которому определяются моменты перехода тока через нулевые значения, используется безиндуктивный шунт, а в качестве датчика напряжения – резистивный делитель. В алгоритме реализована интервальная оценка точности замера.

Идентификация вида КЗ осуществляется по числу поврежденных фаз, токам нулевой и обратной последовательностей. По виду КЗ определяется расчетное выражение для ДОМП, по которому выполняется вычисление индуктивности и расстояния  $l$  до места повреждения. Разработанный алгоритм ДОМП не содержит активных составляющих сопротивления (и, соответственно, падений напряжения на них) и не зависит от основного искажающего замер фактора – переходного сопротивления в месте КЗ.

### IV. Методика проведения исследований алгоритма ДОМП на компьютерных моделях

Для исследования переходных процессов при повреждениях (КЗ) в программном продукте Simulink были разработаны модели электрических сетей 110-330 кВ с односторонним питанием: упрощенные и комплексные, соответствующие реальным схемам электроснабжения (рис. 1) [8]. Результатом моделирования переходных процессов являются зависимости (осциллограммы) электрических величин, зарегистрированные с моделей первичных преобразователей, установленных в точке замера (месте установки ИС).

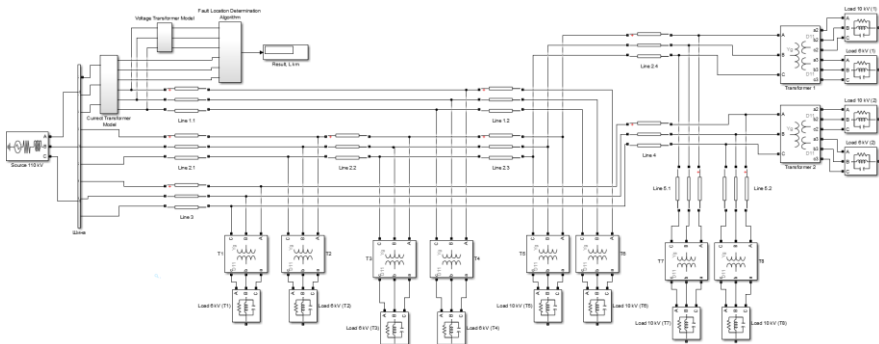


Рис. 1. Модель реального участка сети 110 кВ в Simulink

Разработана программа в MATLAB, выполняющая серию вычислительных экспериментов без участия исследователя. Программа в MATLAB работает следующим образом: при помощи специализированных функций программа выполняет задание параметров модели в Simulink, запускает расчет модели, получает мгновенные значения тока, производной тока и напряжения, выполняет их обработку согласно исследуемому алгоритму определения места повреждения, записывает результаты расчетов в массив и повторяет указанную последовательность действий для следующего набора параметров.

#### **V. Исследование алгоритма ДОМП на имитационных моделях**

Исследования были проведены для трех типов первичных преобразователей тока и следующих вариантов реализаций алгоритма (рис. 2):

- 1) первичный преобразователь тока – электромагнитный трансформатор, производная тока вычисляется математически;
- 2) не насыщающийся первичный преобразователь тока (магнитотранзисторный преобразователь, оптический трансформатор, пояс Роговского с интегрированием сигнала и др.), производная тока вычисляется математически;
- 3) первичный преобразователь тока – пояс Роговского без интегрирования сигнала.

В разработанной программе были выполнены следующие исследования работы алгоритмов определения мест повреждения: действие избирателя поврежденных фаз при различных видах КЗ; расчет индуктивности (расстояния) до места повреждения по мгновенным значениям выборок измеряемых электрических величин; оценка точности алгоритма в условиях влияния искажающих замер факторов.

Для всех видов КЗ поврежденные фазы определялись верно, в том числе, при КЗ через переходное сопротивление. Результаты оценки точности алгоритма в зависимости от изменения факторов представлены на рис. 2-6. На рис. 2 представлен результат оценки погрешности способа ДОМП для случая однофазного КЗ при различных удаленностях КЗ. Полученная зависимость погрешности от расстояния аппроксимировалась полиномом второго порядка. На рис. 3-6 представлены только аппроксимирующие кривые.

Результаты исследований вариантов организации системы определения места повреждения (рис. 2) показывают, что при физическом получении производной тока с пояса Роговского погрешность расчета расстояния до места КЗ будет наименьшей (кривая 1 на рис. 1). Погрешности электромагнитных трансформаторов возрастают при малых и при больших (при насыщении магнитопровода) первичных токах. Необходимо отметить, что приведенная оценка погрешности алгоритма ДОМП, использу-

ющего мгновенные значения тока от электромагнитного трансформатора (кривая 3), выполнена при небольшом насыщении магнитопровода трансформатора (малые значения апериодической составляющей). При глубоком насыщении магнитопровода трансформатора погрешность ДОМП составляет более 50 %.

Погрешность способа ДОМП при использовании пояса Роговского (без интегрирования сигнала) была наименьшей и при исследовании влияния других искажающих замер факторов, поэтому далее показаны результаты исследований погрешностей только указанного способа.

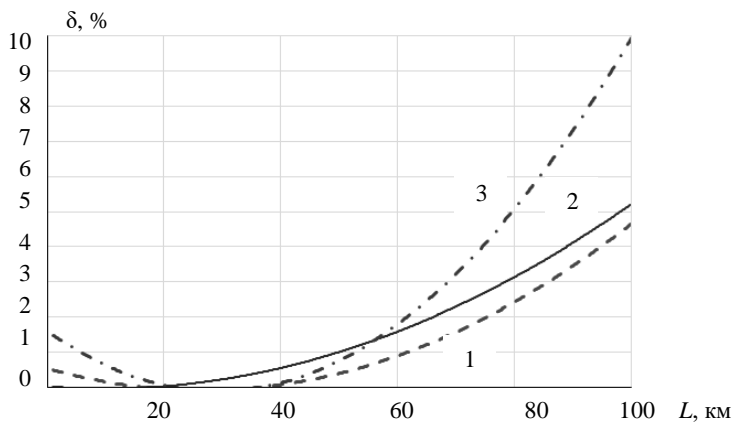


Рис. 2. Погрешность способа ДОМП от удаленности КЗ (аппроксимация замеров полиномом второго порядка) при использовании в качестве первичных датчиков тока:

- 1 – пояса Роговского для получения производной тока и безиндуктивного шунта;
- 2 – не насыщаемого датчика тока с последующим дифференцированием;
- 3 – электромагнитного ТТ с последующим дифференцированием

На рис. 3-6 представлены зависимости погрешностей способа ДОМП при изменяющихся значениях переходного сопротивления, фазы пробоя и электрической нагрузки на примере расчета расстояния до места однофазного КЗ А0. Переходное сопротивление (рис. 3-4) моделировалось двумя способами: во-первых, активным сопротивлением в месте повреждения (до 50 Ом [9]); во-вторых, дугой, представленной двумя противо-ЭДС ( $U_{arc}$ ). При изменении переходного сопротивления погрешность способа не превышает 7 или 2 % в зависимости от модели переходного сопротивления. Фаза напряжения на поврежденной фазе, изменение нагрузки и наличие емкостей фаз на землю не оказывают значительного влияния на точность измерения (рис. 5, 6). На рис. 6 нагрузка показана в процентах от нагрузки данной линии в нормальном режиме.



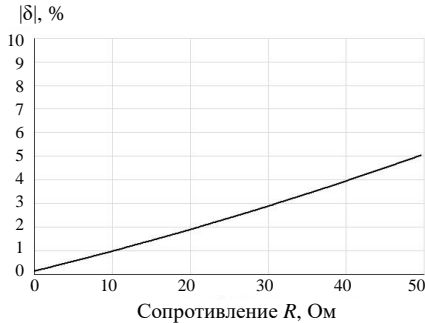


Рис. 3. Погрешность способа ДОМП от переходного сопротивления (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

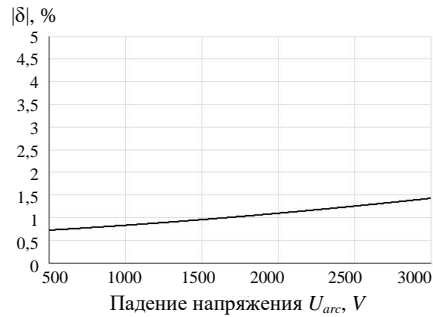


Рис. 4. Погрешность способа ДОМП от падения напряжения на дуге в месте КЗ (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

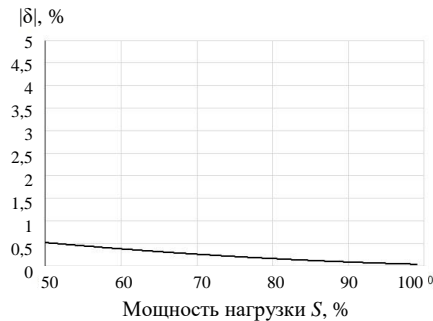


Рис. 5. Погрешность способа ДОМП от изменения нагрузки (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

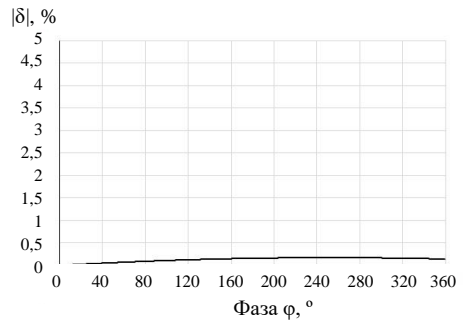


Рис. 6. Погрешность способа ДОМП от фазы пробоя (для КЗ А0) при использовании замера с пояса Роговского и удаленности КЗ 20 км

## VI. Исследование макетного образца ИС с функцией ДОМП

Была проведена оценка работы алгоритма при моделировании переходных процессов в среде RSCAD и выдачи SV-потока первичных сигналов с платы GTNETx2-SV-v6 комплекса моделирования RTDS непосредственно в режиме реального времени. Программа испытаний (диапазон изменения искажающих замер факторов) была аналогична той, что указана в предыдущем пункте.

При моделировании переходных процессов в RSCAD и подаче сигналов первичных величин непосредственно на ИС погрешности способа ДОМП получились сопоставимыми с погрешностями, полученными в предыдущих опытах. Точность способа не зависит от величины переходного сопротивления, величины электрической нагрузки и угла пробоя. При изменении указанных факторов для одной удаленности КЗ погрешность не превышает 1-2 %. Наибольшее влияние на точность ДОМП оказывает удаленность КЗ. При удаленности 100 км от точки замера погрешность может составить 8 %.

Была проведена оценка работы других устройств (функций) ДОМП отечественного производства, в том числе, работающих по протоколу МЭК-61850 (Устройство 1 – Релематика), по программам испытаний, описанных в предыдущих пунктах. Алгоритмы ДОМП производителями не раскрываются.

Устройство 1 (с шиной процесса) содержит функцию ДОМП одностороннего замера. При подаче Comtrade-осциллограмм в виде  $SV$ -потока были получены погрешности ДОМП не более 10 %. Однако при больших переходных сопротивлениях (50 Ом), расстояние определено не было. Устройство 2 (Сириус ОМП) является отдельным устройством одностороннего или (при наличии канала связи) двухстороннего замера. При проверке устройства Comtrade-осциллограммы воспроизводились поверочным устройством Omicron-356 СМС. При подаче токов и напряжений на устройство были получены погрешности ДОМП не более 10 %. Однако, при удаленности 10 км расстояние определено не было.

Исследования алгоритма ДОМП показали устойчивость его функционирования и приемлемую точность, в том числе при влиянии основного искажающего замер фактора – переходного сопротивления. При испытаниях ИС точность алгоритма оказалась сопоставимой с точностью алгоритмов других устройств (погрешность не более 8 %), не было выявлено случаев сбоя работы или отсутствия расчета (в отличие от испытываемых образцов других фирм).

*Исследование выполнено в Ивановском государственном энергетическом университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10455).*

© Яблоков А.А., 2019

© Филатова Г.А., 2019

© Петров А.Е., 2019

**Библиографический список**

- [1] Csanii E. What is the digital substation and what makes it digital? // Electrical Engineering Portal. [Электронный ресурс]. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation> (дата обращения 23.08.2019).
- [2] Richards S., Pavaiya N., Boucherit M., Ferret P., Diemer P. Denmark digital substations: Feedback on site experience [Электронный ресурс]. URL: [https://www.pacw.org/issue/june\\_2014\\_issue/lessons\\_learned/digital\\_substations\\_feedback\\_on\\_site\\_experience/complete\\_article/1.html](https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html) (дата обращения 23.08.2019).
- [3] Lebedev V.D., Yablokov A.A. Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 177. 012099. P. 1-9.
- [4] Кувшинов Г.Е., Соловьев Д.Б. Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики. Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2012. – 316 с.
- [5] Yablokov A., Filatova G., Timofeev A. Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location // Proc. of MATEC Web Conf. 2017. № 141. 01058. P. 1-5.
- [6] Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16-21.
- [7] Stojcevski B., Kalam A. Fault location in overhead power lines using the IEC61850 international protocol // International Review on Modelling and Simulations (IREMOS.). 2010. № 3 (5). P. 888-899.
- [8] Козлов В.Н., Бычков Ю.В., Ермаков К.И. О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 1. С. 42-46.
- [9] СТО 56947007-29.240.55.224-2016. Методические указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Введ. 2016-08-17. ПАО «ФСК ЕЭС», 2016. – 75 с.
- [10] Яблоков А.А., Тимофеев А.С., Филатова Г.А. Разработка алгоритма дистанционного определения места повреждения на основе данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения // Кибернетика энергетических систем: сборник мат. XL научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), Россия, 2018. С. 443-447.

**A.A. Yablokov, G.A. Filatova, A.E. Petrov**

## **RESEARCH OF FAULT LOCATION FUNCTION IN COMPOSITION OF INFORMATION SYSTEM**

Ivanovo State Power University n.a. V.I. Lenin  
Ivanovo, Russia

**Abstract.** The development of remote fault location (RFL) is still an urgent task, since the existing RFL methods often do not provide the required accuracy, are unstable to the influence of measurement-distorting factors. Innovative digital small-sized current and voltage transformers, installed directly on a power transmission line support, make possible to measure electrical values in the normal and emergency mode at intermediate points of the electrical network, for example, at the border of balance accessories. The concept of an information system (IS) connected to digital current and voltage transformers with the function of remote fault location (RFL) is proposed. The results of the study of the RFL method on the computer-assisted simulation models, as well as the results of the study of the IS device at the RTDS simulation complex are given.

**Keywords:** digital instrument transformers, fault location, information system.

### **References**

- [1] E. Csanyi, What is the digital substation and what makes it digital? // Electrical Engineering Portal [Online]. Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation>. [Accessed: Aug. 23, 2019].
- [2] S. Richards, N. Pavaiya, M. Boucherit, P. Ferret and P. Diemer, Denmark digital substations: Feedback on site experience [Online]. Available at: [https://www.pacw.org/issue/june\\_2014\\_issue/lessons\\_learned/digital\\_substations\\_feedback\\_on\\_site\\_experience/complete\\_article/1.html](https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html). [Accessed: Aug. 23, 2019].
- [3] V.D. Lebedev and A.A. Yablokov, «Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 177, 012099, pp. 1-9, Feb. 2017.
- [4] G.E. Kuvshinov and D.B. Solovyov, *Sovremennye napravleniya razvitiya izmeritel'nykh preobrazovatelej toka dlya relejnoj zashchity i avtomatiki (Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics)*. Vladivostok: Vladivostok Branch of the Russian Customs Academy, 2012 (in Russian).
- [5] A. Yablokov, G. Filatova and A. Timofeev, «Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location», in proc. *MATEC Web Conf.*, vol. 141, 01058, pp. 1-5, Dec. 2017.
- [6] A.L. Kulikov and I.A. Lukicheva, «Fault location in power transmission lines by instantaneous values of alarm oscillograms», *Vestnik IGEU*, vol. 5, pp. 16-21, 2016 (in Russian).

- 
- [7] B. Stojcevski and A. Kalam, «Fault location in overhead power lines using the IEC61850 international protocol», *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, vol. 3, no. 5, pp. 888-899, Oct. 2010.
- [8] V.N. Koslov, Y.V. Bychkov and K.I. Ermakov, «Accuracy of modern fault location technique», *Relay Protection and Automation*, vol. 1, pp. 42-46, 2016 (in Russian).
- [9] Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu mest povrezhdenij VL napryazheniem 110 kV i vyshe (Guidelines for fault location determination on overhead power lines voltage 110 kV and more). Standard of company PJSC FGC UES 56947007-29.240.55.224-2016. Introduction date: 17.08.2016 (in Russian).
- [10] A.A. Yablokov, A.S. Timofeev and G.A. Filatova, «Razrabotka algoritma distancionnogo opredeleniya mesta povrezhdeniya na osnove dannyh ot cifrovyyh transformatorov toka i napryazheniya (Development of the remote fault location algorithm based on the data from digital current and voltage transformers)», in proc. *Kibernetika ehnergeticheskikh system (Cybernetics of power systems)*, 2018, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherskassk, Russia, 2018, pp. 443-447 (in Russian).

УДК 621.332

**И.П. Карпов, С.В. Демидов****СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
В ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Горьковская дирекция по энергообеспечению

Представлен вариант устройства определения коротких замыканий (КЗ), ранее не применявшийся в эксплуатации на полигоне железных дорог в России. Приводится обзор способов диагностики контактной сети на наличие устойчивых КЗ, разработанных с целью защиты электроустановок от неуспешных повторных включений. Для исследования применяемых в эксплуатации методов определения повреждений использовались данные электронных осциллографов, установленных на тяговых подстанциях Горьковской ЖД. Актуальность и практическая значимость работы определена тем, что автоматическое повторное включение (АПВ) является важной частью бесперебойного функционирования системы тягового электроснабжения. Анализ работы защит выключателей фидеров переменного тока показывает, что большинство КЗ являются проходящими, т.е., самоустраиваются за счет термического разрушения предметов, вызвавших перекрытие изоляции, током короткого замыкания, или за счет деионизации перекрытого изолирующего воздушного промежутка в бестоковую паузу (время АПВ в среднем 4-6 с). При подобных КЗ основная изоляция тяговой сети не повреждается, за счет чего и происходит успешное повторное включение. Но есть и другие виды короткого замыкания: глухие, металлические КЗ, при которых происходит непосредственный контакт элементов тяговой сети, находящихся под разными потенциалами (например, в результате падения контактного провода на рельс); неустойчивые КЗ, вызванные повреждением основной изоляции (например, разбитая гирлянда изоляторов). Повторное включение на такие виды КЗ может привести к развитию аварии, разрушению дорогостоящего оборудования.

**Ключевые слова:** автоматическое повторное включение, выявление повреждений после аварийного отключения, наведенное напряжение, неустойчивое повреждение, металлическое короткое замыкание, опробование изоляции.

**1. Введение**

В настоящее время, в системе тягового электроснабжения переменного тока системы 25кВ (2\*25 кВ) остается актуальной проблема определения наличия (или отсутствия) повреждения в контактной сети после аварийного отключения выключателя фидера. Этот вопрос является одним из ключевых в процессе автоматизации электроснабжения тяговых потреби-

телей. Наряду с этим вопросом, были неоднократно рассмотрены и особенности автоматического функционирования [1-5].

Рассмотрим два известных способа диагностирования контактной сети (с их преимуществами и недостатками), в результате которых можно определить факт повреждения (или его отсутствия) тяговой сети переменного тока: во-первых, контроль остаточного и наведенного напряжения; во-вторых, опробование состояния сети с токоограничивающим резистором.

### II. Устойчивые короткие замыкания

На полигоне Горьковской железной дороги успешно внедрены методы определения устойчивых, металлических коротких замыканий, которые основаны на анализе остаточного и наведенного напряжения в отключенной контактной сети [6-9].

Для этих целей используется специально установленный трансформатор напряжения ( $TV$ ), подключенный со стороны контактной сети и измеряющий напряжение в линии представленный на рис. 1.

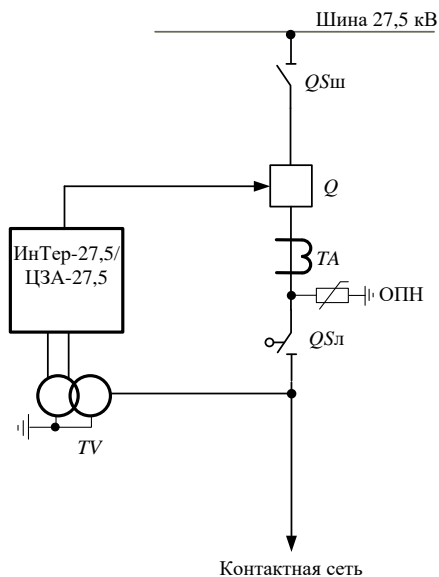


Рис. 1. Схема контроля напряжения терминалами ИнТер-27,5 и ЦЗА-27,5

Определение устойчивых повреждений реализовано на базе микропроцессорных терминалов защит типа ИнТер-27,5 и ЦЗА-27,5 (рис. 1). После аварийного отключения терминал анализирует напряжение в отклю-

ченной контактной сети. Если измеренное напряжение выше уставки делается вывод об отсутствии устойчивого повреждения и дается разрешение на автоматическое повторное включение выключателя фидера.

Осциллограмма при устойчивом КЗ (завешана штанга в середине межподстанционной зоны, имитация металлического КЗ) представлена на рис. 2.

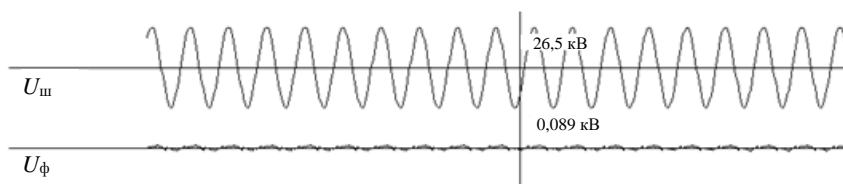


Рис. 2. Осциллограмма при устойчивом, металлическом КЗ:

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера в линии (трансформатор *TV* на рис. 1)

Измеренное наведенное напряжение составило 0,089 кВ при нормальном уровне 3-6 кВ.

Определение отсутствия повреждений и разрешение на АПВ определяется косвенно, на основании анализа уровня напряжения в отключенной контактной сети.

### III. Неустойчивые короткие замыкания

Косвенный метод хорошо зарекомендовал себя при устойчивых повреждениях, в то же время существует вид коротких замыканий, которые не выявляются косвенным путем. Так называемые неустойчивые короткие замыкания, при которых нет металлической связи токоведущих частей с землей, изоляция нарушена, но не до конца. При данных видах повреждений анализ наведенного напряжения будет говорить о проходящем характере замыкания и о возможности АПВ. Уровень измеренного напряжения будет в пределах 3-6 кВ. Но при подаче рабочего напряжения (27,5 кВ) произойдет повторное аварийное отключение. Это происходит из-за того, что поврежденная изоляция контактной сети или электроподвижного состава (ЭПС) держит остаточное и наведенное напряжение (3-6 кВ), но повторно пробивается при подаче рабочего напряжения (27,5 кВ).

Пример неустойчивого КЗ – разрушенная гирлянда изоляторов. Осциллограмма неуспешного включения при этом повреждении представлена на рис. 3.



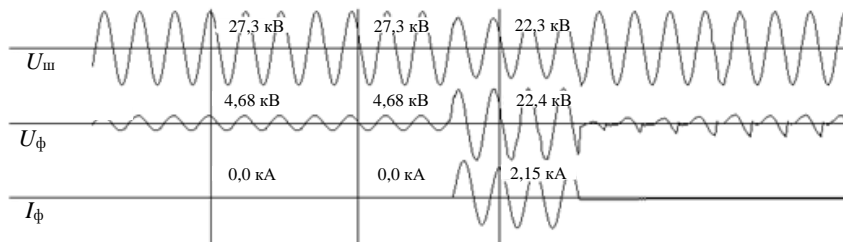


Рис. 3. Напряжения в отключенной к/с при неустойчивом КЗ (разрушение гирлянды изоляторов):

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера, в линии;  $I_{ф}$  – ток фидера

Уровень напряжения в отключенной контактной сети (4,68 кВ) говорит об отсутствии повреждения, но включение неуспешное (ток замыкания 2,15 кА). Позже, на участке контактной сети была обнаружена разрушенная гирлянда изоляторов типа ПС-70.

Еще один пример подобного повреждения: перекрытие ОПН установленного между  $Q$  и  $QS_{л}$  (рис. 1). Осциллограмма неуспешного включения представлена на рис. 4.

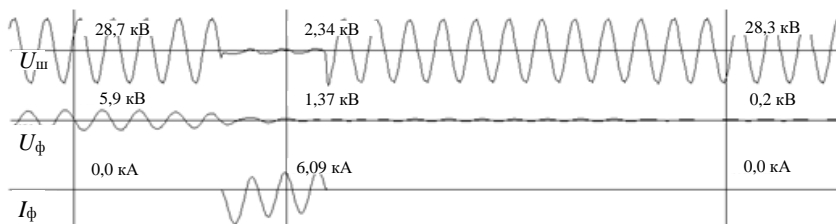


Рис. 4. Напряжения в отключенной к/с при неустойчивом КЗ (пробой изоляции корпуса ОПН):

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера, в линии;  $I_{ф}$  – ток фидера

Измеренное напряжение (5,9 кВ), как и в случае с поврежденной гирляндой изоляторов, говорит об отсутствии устойчивого КЗ, но при подаче повторного происходит повторный пробой изоляции корпуса ОПН. Воздействие тока КЗ при этом повторном включении окончательно разрушает изоляцию и переводит данное повреждение в разряд устойчивых, наведенное напряжение снижается с 5,9 кВ до 0,2 кВ.

Таким образом, для гарантированного успешного повторного включения необходимы дополнительные методы определения отсутствия по-

вреждения. Необходимо дополнить косвенные методы анализа наведенного напряжения активным воздействием на контактную сеть путем опробования изоляции в бестоковую паузу.

#### IV. Опробование изоляции рабочим напряжением

Вариант опробования через испытательный токоограничивающий резистор был предложен в учебнике «Релейная защита» (2009 г.) Е.П. Фигурнова [10]. Испытательный резистор ( $R_n$ ) сопротивлением 2000 Ом постоянно подключен к шине 27,5 кВ параллельно выключателю  $Q$  фидера. При аварийном отключении выключателя  $Q$  напряжение 27,5 кВ подается в контактную сеть непосредственно через  $R_n$ . Реле тока  $KA$  и напряжения  $KV$  контролируют напряжение и ток в контактной сети. Схема опробования представлена на рис. 5.

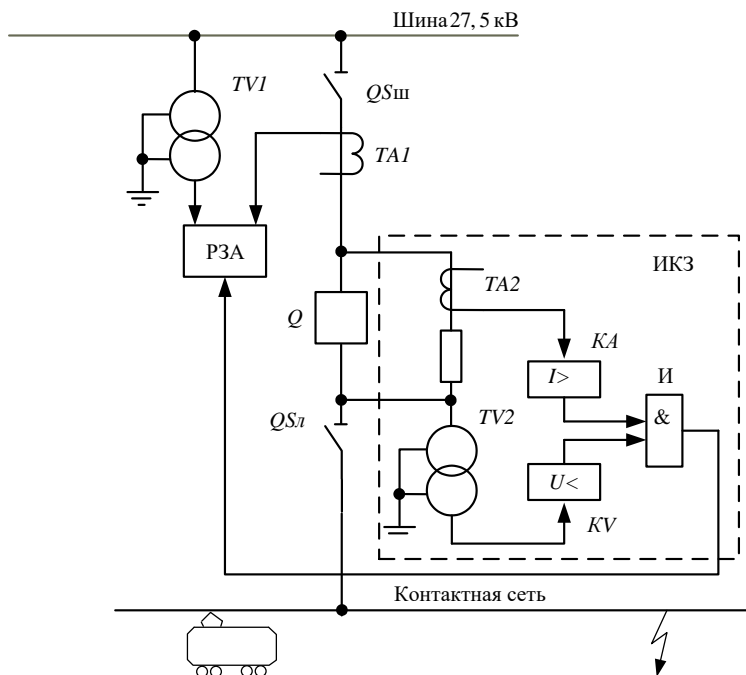


Рис. 5. Схема опробования через испытательный резистор

Если повреждение отсутствует, и на отключенной зоне нет ЭПС, через  $R_n$  будет протекать ток холостого хода  $I_C$  (ток, измеряемый схемой  $I_{TA2} = I_C$ ), вызванный распределенной емкостью между контактной сетью и рельсами. Рассчитаем ток  $I_C$  и напряжение, измеряемое схемой опробова-

ния ( $U_{TV2}$ ) при селективном отключении (отключение выключателя на тяговой подстанции и посту секционирования) на межподстанционной зоне 40 км (зоны меньшей длины встречаются крайне редко). При данных условиях ток холостого хода определяется распределенной емкостью половины межподстанционной зоны (пост секционирования расположен в середине), длина равняется:  $L = 20$  км, при удельной емкости  $C_y = 20 \cdot 10^{-9}$  Ф/км [2] емкостное сопротивление составит:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C_y \cdot L} = \frac{1}{314 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \cdot 20} = 7962 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2 \pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$  угловая частота.

Ток холостого хода при этом:

$$I_c = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_c^2}} = \frac{27500}{\sqrt{2000^2 + 7962^2}} = 3,35 \text{ А}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ш}} = 27500$  В – напряжение шин.

Схема замещения представлена на рис. 6.

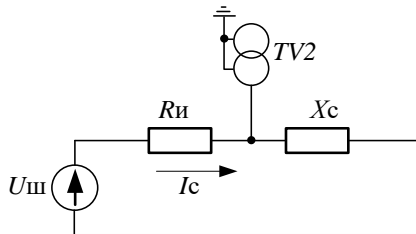


Рис. 6. Схема замещения при отсутствии повреждения и отсутствии ЭПС на зоне

При этом напряжение в контактной сети, измеряемое схемой опробования (через  $TV2$ ) снижается до:

$$U_{TV2} = I_c \cdot X_c = 3,35 \cdot 7962 = 26672 \text{ В}. \quad (3)$$

Если повреждение отсутствует, и на отключенной зоне есть ЭПС, через  $R_{\text{и}}$  будет протекать остаточный ток  $I_{\text{ост}}$ , обусловленный собственными нуждами ЭПС, схема показана на рис. 7.

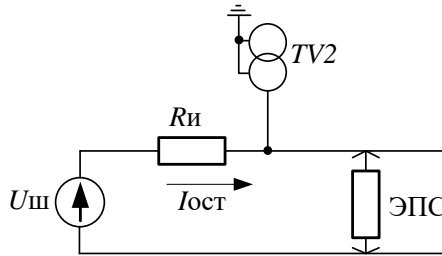


Рис. 7. Схема замещения при отсутствии повреждения и наличии ЭПС на зоне

Остаточный ток может достигать 10-11 А [10]. При этом напряжение в контактной сети, измеряемое схемой опробования, резко снижается до:

$$U_{TV2} = U_{ш} - I_{ост} \cdot R_{и} = 27500 - 10 \cdot 2000 = 7500 \text{ В.} \quad (4)$$

Рассмотрим режим устойчивого повреждения (рис. 8):

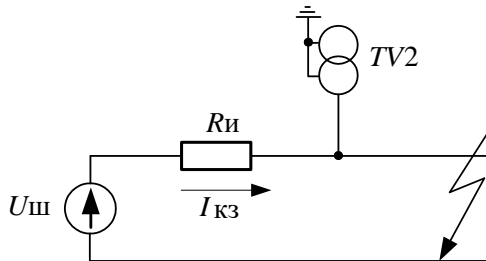


Рис. 8. Схема замещения при наличии повреждения

Ток, измеряемый схемой (сопротивление контактной сети на порядки меньше сопротивления  $R_{и}$ , поэтому им можно пренебречь):

$$I_{кз} = \frac{U_{ш}}{R_{и}} = \frac{27500}{2000} = 13,8 \text{ А.} \quad (5)$$

Напряжение, измеряемое схемой опробования, при этом стремится к нулю  $U_{TV2} \rightarrow 0$ .

Ток при КЗ сопоставим с остаточным током ЭПС, поэтому по значению тока нельзя отличить нормальный режим от режима КЗ. Реле  $KA$  в схеме нужно лишь для отстройки от емкостных токов, определение наличия КЗ осуществляется по напряжению. Уставка реле напряжения принимается 5800 В, поскольку в режиме КЗ напряжение не превышает 4000 В, а при отсутствии повреждения не опускается ниже 7000 В. При фиксации напряжения менее уставки схема опробования делает вывод о наличии повреждения и дает команду на запрет АПВ и на отключение разъединителя  $QS_{л}$  для обесточивания  $R_{и}$ . Но устойчивые повреждения успешно определяются и косвенными методами, без подпитки места повреждения током опробования.

Недостатком схемы является длительное (равное времени отключения разъединителя  $QS_{л}$  – около 1 с) подпитывание места КЗ током опробования. Если пробой изоляции сопровождался дуговым процессом, то либо дуга погаснет из-за резкого увеличения сопротивления цепи тока КЗ (на величину  $R_{и} = 2000$  Ом); либо дуга не погаснет, и тогда возможно последующее развитие повреждения из-за ее термического действия. Если дуга погасла, а повреждение осталось (неустойчивое КЗ), то схема опробования оценит такое повреждение как проходящее и разрешит АПВ, что приведет к неуспешному включению. К тому же придется заменить  $QS_{л}$ , ведь штатные разъединители рассчитаны на отключение токов до 3-5 А (при устойчивом повреждении ток отключения составит 13-14 А).

Помимо этого, при КЗ на шинах фидера контактной сети отключатся, но ток подпитки от смежной подстанции будет протекать через  $R_{и}$ , схема приведена на рис. 9.

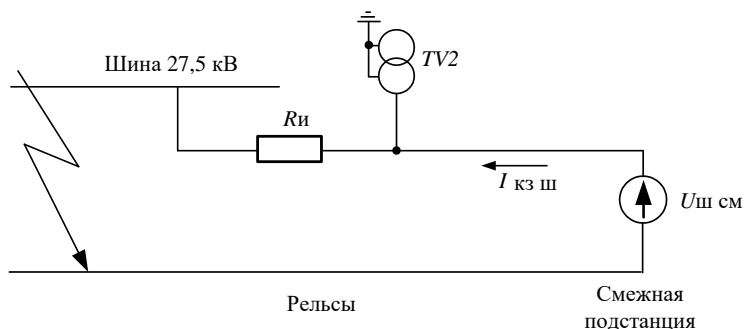


Рис. 9. Схема протекания тока при КЗ на шинах

Рассчитаем ток подпитки от смежной подстанции при КЗ на шинах (сопротивление контактной сети на порядки меньше сопротивления  $R_{и}$ ,

поэтому им можно пренебречь, также, для упрощения, не учитываем падение напряжения в контактной сети от протекания рабочего тока):

$$I_{\text{кзш}} = \frac{U_{\text{шсм}}}{R_{\text{и}}} = \frac{27500}{2000} = 13,8 \text{ А.} \quad (6)$$

При этом напряжение, измеряемое схемой опробования ( $TV2$ ), составит:

$$U_{TV2} = U_{\text{шсм}} = 27500 \text{ В.} \quad (7)$$

Для схемы опробования измеренные параметры отключения будут говорить об отсутствии замыкания, команды на отключение  $QS_{\text{л}}$  не будет. Также  $R_{\text{и}}$  не будет зашунтирован включением выключателя (при действии защиты шин 27,5кВ, АПВ фидеров не предусмотрено). Ток подпитки будет оказывать тепловое воздействие на  $R_{\text{и}}$  пока оперативный персонал не отключит  $QS_{\text{л}}$ . Укажем, что в настоящее время этот способ диагностики не применяется на отечественных железных дорогах.

Итак, недостатки рассмотренной схемы таковы: невозможность гарантированного успешного повторного включения, необходимость замены штатных разъединителей  $QS_{\text{л}}$  на отделители, риск разрушения испытательного резистора в результате теплового воздействия от тока подпитки смежной подстанции при КЗ на шинах 27,5 кВ.

#### **V. Импульсное опробование изоляции**

Схема опробования рабочим напряжением является последовательной ( $R_{\text{и}}$  подключен последовательно к шине 27,5 кВ), рассмотрим вариант параллельной схемы опробования, представленной на рис. 10. Вся логика работы реализована в низковольтной части устройства. После аварийного отключения выключателя фидера первым этапом идет анализ напряжения в отключенной контактной сети (косвенный метод определения). При устойчивом КЗ на выходе компаратора  $U <$  присутствует логическая 1, устройство формирует сигнал запрета АПВ.

Если устойчивое КЗ не выявлено (измеренное напряжение выше уставки), на выходе компаратора  $U <$  присутствует логический 0, а на выходе логического инвертора появится логическая 1, что послужит сигналом разрешения для работы генератора высоковольтных импульсов. Произойдет опробование – подача импульса напряжения с последующим измерением импульса тока.

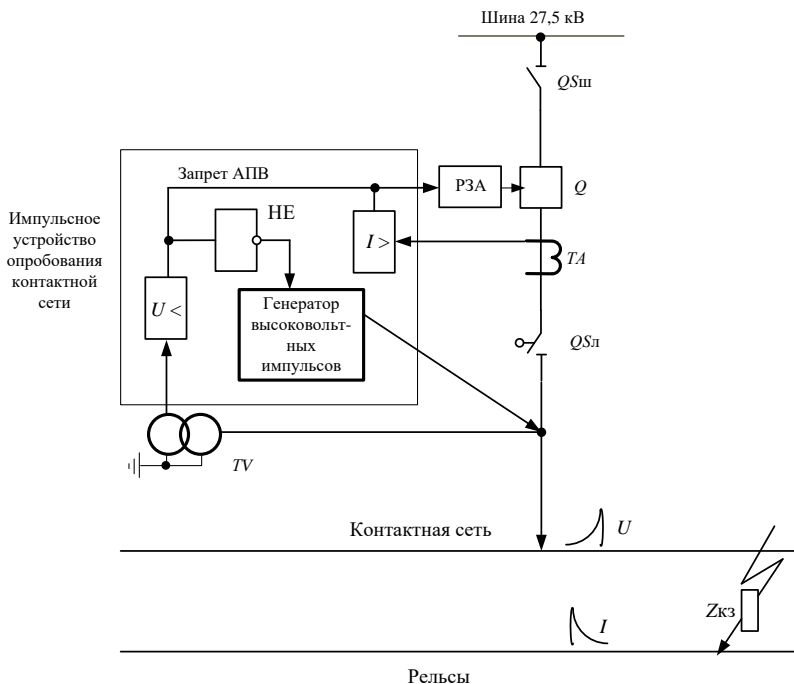


Рис. 10. Импульсная схема опробования (параллельный вариант)

В случае наличия повреждения, устройство зафиксирует импульс тока, амплитудой больше уставки. На выходе компаратора  $I >$  появится логическая 1, что приведет к запрету АПВ. Если импульс тока меньше уставки, делается вывод об отсутствии повреждения и разрешается повторное включение. В данном варианте опробования отсутствует постоянная гальваническая связь шин 27,5 кВ и отключенной контактной сети, соответственно исключены недостатки последовательного опробования.

Опробование проводится высоковольтным импульсом, воздействующим на место повреждения с сопротивлением  $Z_{кз}$ . Поскольку токоограничивающий резистор отсутствует, опробование максимально приближено к подаче рабочего напряжения при АПВ. Схема замещения при данном варианте опробования представлена на рис. 11.

Как видно из схемы замещения, ожидаемое амплитудное значение импульса тока опробования будет зависеть от амплитуды напряжения импульса опробования и сопротивления места КЗ, тяговой сети и генератора импульсов.

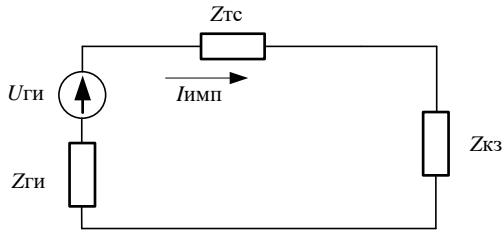


Рис. 11. Схема замещения при импульсном опробовании:  
 $Z_{тс}$  – сопротивление тяговой сети (0-10 Ом, в зависимости от места КЗ);  
 $Z_{кз}$  – сопротивление места КЗ при повреждении;  
 $Z_{гип}$  – внутреннее сопротивление генератора импульсов;  
 $U_{гип}$  – амплитудное значение импульса опробования

Исключение возможности пережога в данном варианте опробования обеспечивается сверхмалым временем импульса (при минимальном времени пережога 100-150 мс). Режим работы данной схемы опробования будет исследован дополнительно.

#### VI. Выводы

Выполнен анализ известных способов диагностики контактной сети, показывающий, что существующие методы имеют ряд недостатков и не могут обеспечить гарантированное успешное повторное включение.

Предложен вариант импульсного опробования, сочетающего в себе косвенный и активный метод определения возможности успешного повторного включения.

© Карпов И.П., 2019

© Демидов С.В., 2019

#### Библиографический список

- [1] Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М: МГУПС, 2014. – 173 с.
- [2] Жарков Ю.И., Овласюк В.Я., Сухопрудский Н.Д. Автоматизация систем электроснабжения. М.: Транспорт, 1990. – 359 с.
- [3] Кузнецов В.В., Кузнецова О.В. Методы обнаружения короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: межвуз. сб. научн. тр. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1994. С. 175-178.
- [4] Герман Л.А., Селякин В.С. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 34-40.
- [5] СТО РЖД 07.021.1-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1. Общие принципы и правила по-



- строения защит, блокировок и автоматики в системах электроснабжения. Введ. 2015-08-01. – 48 с.
- [6] Герман Л.А., Демидов С.В., Попов Д.С., Якунин Д.В. Простой способ поиска повреждения на контактной сети переменного тока // Локомотив. 2008. № 4. С. 45-46.
- [7] Герман В.Л. Микропроцессорное устройство контроля коротких замыканий в тяговых сетях // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 6. С. 22-27.
- [8] Герман Л.А., Герман В.Л., Жевлаков Д.А., Карпов И.П. Устройство контроля устойчивого короткого замыкания и запрета автоматического повторного включения выключателя контактной сети переменного тока, Пат. 127196 РФ, заявл. 05.09.2012; опубл. 20.04.2013. – Бюл. № 11.
- [9] Герман Л.А., Герман В.Л. Устройство контроля проходящего и устойчивого короткого замыкания в контактной сети переменного тока, Пат. 2397502 РФ, заявл. 29.04.2009; опубл. 20.08.2010. – Бюл. № 13.
- [10] Фигурнов Е.П. Релейная защита. В 2-х ч. Ч. 2. 3-е изд. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ЖД транспорте», 2009. – 591 с.

**I.P. Karpov, S.V. Demidov**

## **METHODS OF DIAGNOSTICS OF AC CONTACT NETWORK IN POST-EMERGENCY SITUATIONS**

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply  
Road electrotechnical laboratory  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Automatic reclosing (AR) is an important part of the smooth operation of the traction power supply system. Analysis of the operation of the protection of AC feeders shows that most short circuits self-destruct, as a result of thermal destruction of objects that caused insulation fault by a short circuit current; or as a result of deionization of the shorted insulating air gap in a dead time (AR time on average 4-6 sec). But there are other types of short circuits: metal short-circuit in which there is permanent contact of the elements of the catenary system, which are under different potentials (for example, as a result of the contact wire falling on the rail). Re-inclusion during such short circuits can lead to the development of an accident, the destruction of expensive equipment. To protect electrical installations from unsuccessful automatic reclosing various methods have been developed for diagnostics ac catenary system for detecting metal short circuits. An overview of these methods with the identification of advantages and disadvantages is presented in this article. For this, we used the data of electronic oscilloscopes installed at traction substations of the Gorky Railway. At the end of the article, a variant of the device for determining short circuit, previously not used in operation on railways in Russia, is presented.

**Keywords:** automatic reclosing, fault-finding after emergency outage, intermittent short circuit, insulation testing, induced voltage, metal short circuit.

### References

- [1] L.A. German and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka (Automation of power supply for AC traction network)*. Moscow: MGUPS, 2014 (in Russian).
- [2] Y.I. Zharkov, V.Y. Ovlasyuk and N.D. Sukhoprudskiy, *Avtomatizatsiya sistem elektrosnabzheniya (Automation of power supply systems)*. Moscow: Transport, 1990 (in Russian).
- [3] V.V. Kuznetsov and O.V. Kuznetsova, «Metody obnaruzheniya korotkogo zamykaniya v tyagovoy seti peremennogo toka (Short circuit detection methods in AC traction network)», *Avtomatizirovannyye sistemy elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog*, 1994, RGUPS, Rostov-on-Don, pp.175-178 (in Russian).
- [4] L.A. German and V.S. Selyakin, «Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka (Automation of power supply traction AC)», *Zheleznodorozhnyy transport (The Railway Transport Magazine)*, vol. 7, no. 7, pp 34-40, 2010 (in Russian).
- [5] Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast' 1. Obshchiye printsipy i pravila postroyeniya zashchit, blokirovok i avtomatiki v sistemakh elektrosnabzheniya (Protection of railway power supply systems against short circuits and overload. Part 1. General principles and rules for the construction of protections, interlocks and automatic devices in power supply systems). Standard of company JSCo «RZD» 07.021.1-2015. Introduction date: 01.08.015 (in Russian).
- [6] L.A. German, S.V. Demidov, D.S. Popov and D.V. Yakunin, «Prostoy sposob poiska povrezhdeniya na kontaktnoy seti peremennogo toka (A simple method to fault-find on a AC catenary system) », *Lokomotiv*, vol. 4, no. 4, pp. 45-46, 2008 (in Russian).
- [7] V.L. German, «Mikroprocessornoe ustrojstvo kontrolya korotkikh zamykaniy v tyagovykh setyah (Microprocessor device for monitoring short circuits in traction power networks) », *Electronics and electrical equipment of transport*, vol. 6, no. 6, pp. 22-27, 2007 (in Russian).
- [8] L.A. German, V.L. German, D.A. Zhevlakov and I.P. Karpov, «Ustroystvo kontrolya ustoychivogo korotkogo zamykaniya i zapreta avtomaticheskogo povtornogo vklucheniya vyklyuchatelya kontaktnoy seti peremennogo toka (A device for monitoring a stable short circuit and prohibiting automatic restarting of an AC contact breaker) », R.F. Patent 127196, April 20, 2013 (in Russian).
- [9] L.A. German, V.L. German, «Ustroystvo kontrolya prokhodyashchego i ustoychivogo korotkogo zamykaniya v kontaktnoy seti peremennogo toka (Control device for passing and stable short circuit in contact AC network)», R.F. Patent 2397502, Aug. 20, 2010 (in Russian).
- [10] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita. V 2-kh chastyakh. Chast' 2 (Relay protection. In 2 parts. Part 2.)* 3rd ed. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrabotke i ispolzovaniyu na zh.d. transporte», 2009 (in Russian).

УДК 621.31

А.В. Погорелов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДНИЧНОЙ СЕТИ С ПАССИВНЫМИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

В сетях с мощными нелинейными электроприемниками (например, тиристорный электропривод скиповых и клетевых подъемных установок) широко применяются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства для подавления гармонических составляющих тока и напряжения и компенсации реактивной мощности. В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности работы данных устройств в рудничных сетях. Для выявления возможности возникновения нежелательных резонансных явлений в рудничной сети с пассивными фильтрами аналитически и с помощью имитационного моделирования проведено исследование амплитудно-частотных характеристик высоковольтной сети рудодобывающего предприятия. Для анализа частотных характеристик исходная сеть представляется схемой замещения в виде пассивного четырехполюсника, для упрощения которой применяется метод последовательных эквивалентных преобразований. В результате исследований подтверждено, что в сети возникают резонансные явления в связи с установкой пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. На основании полученных данных сделан вывод о необходимости использования устройств, позволяющих осуществлять коррекцию частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов. Предлагается использовать активные или гибридные фильтрокомпенсирующие устройства.

**Ключевые слова:** пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, резонансные явления, рудничная сеть, частотные характеристики сети.

### 1. Введение

Работа регулируемых скиповых и клетевых подъемных установок сопровождается генерацией высших гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтных рудничных сетях [1]. Данная проблема в большинстве случаев решается за счет применения специальных технических средств повышения качества электрической энергии [2].

Одними из наиболее распространенных, удобных и экономичных технических средств компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений являются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [3]. Однако их эффективность может снижаться при

изменении гармонического состава токов и напряжений и параметров сети, а также установка пассивных фильтров может привести к следующим нежелательным явлениям: режимы перекомпенсации и недокомпенсации реактивной мощности при значительных изменениях потребляемой активной мощности [4], возникновение резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и питающей сетью.

Резонансные явления на высших гармониках проявляются в очень малых значениях сопротивления для частот близких к компенсируемым частотам высших гармоник, что вызывает увеличение токов гармоник и приводит к негативным последствиям. Для выявления наличия резонансных явлений необходимо исследовать частотные характеристики сети, описывающих влияние внутренних параметров источников напряжения, линий электропередач, трансформаторов и других элементов системы электроснабжения на передачу высших гармоник. Оценить эффективность компенсации высших гармоник и выявить наличие резонансов позволит частотная характеристика сети с установленными ФКУ [2].

## II. Материалы и методы

На рис. 1 представлен фрагмент схемы электроснабжения скиповой подъемной установки на примере Яковлевского рудника Белгородской области [1, 5, 6].

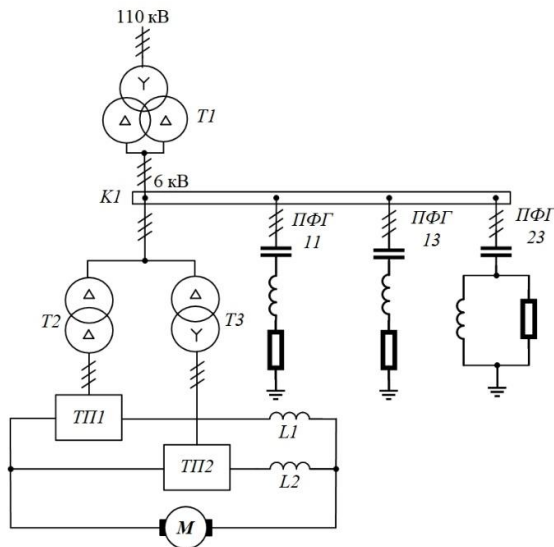


Рис. 1. Фрагмент схемы электроснабжения скиповой подъемной установки рудодобывающего предприятия

Основной особенностью представленной схемы является наличие мощного нелинейного потребителя электрической энергии: электропривода постоянного тока, выполненного по системе 12-ти пульсный тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Для уменьшения суммарных коэффициентов гармонических составляющих по току и напряжению и компенсации реактивной мощности к шине 6 кВ распределительного устройства подключаются два резонансных фильтра, настроенных на подавление 11-й и 13-й высших гармоник, а также широкополосный фильтр второго порядка – для гармоник, начиная с 23-й. Как следует из [1, 5], токи и напряжения принимают формы, близкие к синусоидальным. Установка пассивных фильтров при этом не влияет на временные параметры цикла подъема-опускания и на скорость движения подъемного сосуда [4].

С целью исследования частотных характеристик электрическая сеть приводится к эквивалентной схеме типа «фильтр гармоник – внешняя сеть», которую представим четырехполюсником. На его внешних зажимах действуют источник синусоидального напряжения, нагрузка и источники тока гармоник  $J_k$  (рис. 2).

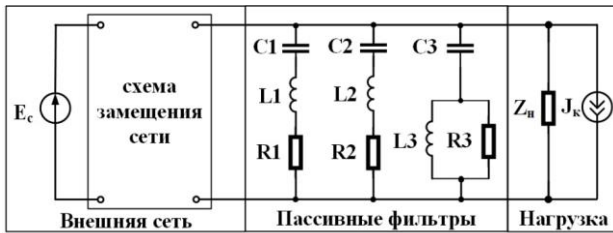


Рис. 2. Эквивалентная схема  
«Пассивные фильтры гармоник – внешняя сеть»

Внешняя сеть представляет собой источник синусоидального напряжения и схему замещения сети. Схема замещения сети состоит из индуктивного сопротивления источника  $X_c$ , схемы замещения высоковольтной линии 110 кВ, схемы замещения трансформатора 110/6 кВ и схемы замещения линия 6 кВ (рис. 3). Расчетные параметры элементов схемы замещения сети и пассивных фильтров представлены в табл. 1 [5].

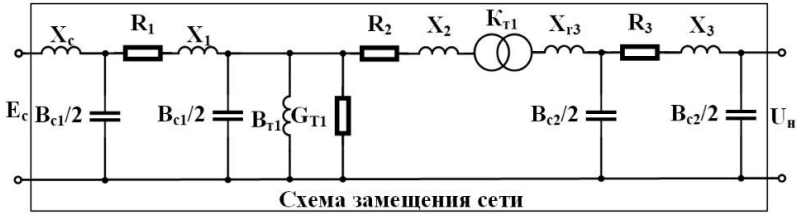


Рис. 3. Схема замещения линий электропередачи и трансформатора

Таблица 1.  
Расчетные параметры элементов  
схемы замещения и пассивных фильтров

Элемент системы электроснабжения	Значения параметров схемы замещения
Система	$X_c = 15,7 \text{ Ом}$
Высоковольтная линия 110 кВ, провод АС-185	$R_1 = 6,46 \text{ Ом}; X_1 = 16,77 \text{ Ом}; B_{c1} = 111,53 \text{ мкСм}$
Трансформатор ТРДН-25000/110	$R_2 = 2,54 \text{ Ом}; X_2 = 55,55 \text{ Ом}; K_{T1} = 0,055;$ $G_{T1} = 2,04 \text{ мкСм}; B_{T1} = 13,23 \text{ мкСм}$
Реактор РБСГ 10-2-1600-0,25	$X_{r3} = 0,25 \text{ Ом}$
Кабельная линия 6 кВ, кабель ААБЛГ-6,3х150	$R_3 = 0,09 \text{ Ом}; X_3 = 0,03 \text{ Ом}; B_{c2} = 260 \text{ мкСм}$
Резонансный пассивный фильтр 11 гармоники	$R = 0,1047 \text{ Ом}; C = 46 \text{ мкФ}; L = 1,817 \text{ мГн}$
Резонансный пассивный фильтр 13 гармоники	$R = 0,1138 \text{ Ом}; C = 35,87 \text{ мкФ}; L = 1,672 \text{ мГн}$
Широкополосный пассивный фильтр (23 гармоника и выше)	$R = 1,937 \text{ Ом}; C = 71,4 \text{ мкФ}; L = 0,268 \text{ мГн}$

Для построения частотной характеристики применим классические методы последовательных эквивалентных преобразований четырехполюсника. Для упрощения расчетов применяется программный пакет *Mathcad*.

Поскольку анализ частотных характеристик сети с установленными ФКУ экспериментальным путем представляет собой достаточно трудоемкую и дорогостоящую задачу, поэтому для подтверждения результатов теоретического анализа применим программный комплекс Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems [6-8].

Имитационная модель рудничной сети с установленными пассивными фильтрами (блок PF) и соответствующая ей имитационная модель схемы замещения сети с пассивными фильтрами представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

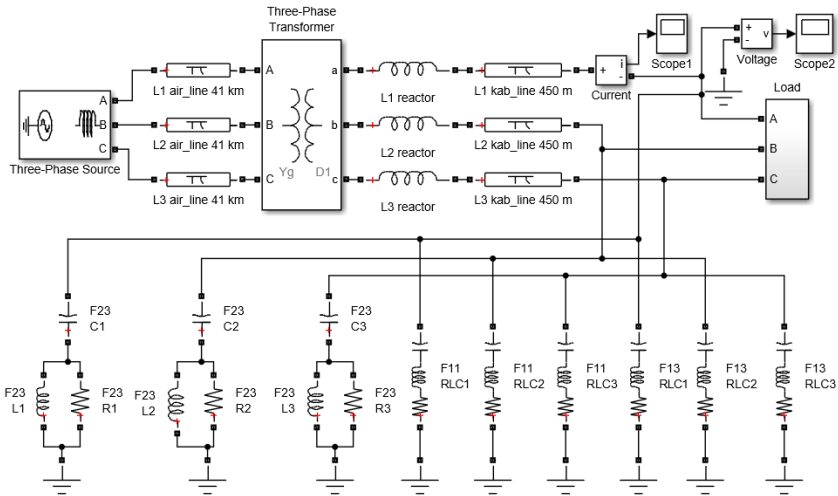


Рис. 4. Имитационная модель системы электроснабжения

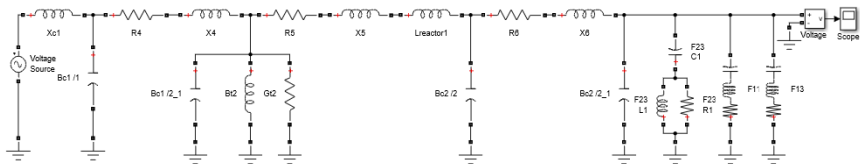


Рис. 5. Имитационная модель схемы замещения в Matlab Simulink

### III. Результаты

На рис. 6 и 7 представлены амплитудно-частотные характеристики сети с установленными пассивными фильтрами (ПФ), полученные расчетным путем и с помощью имитационного моделирования соответственно. На осях ординат обозначен модуль комплексной передаточной функции сети в относительных единицах, причем, шкала является логарифмической, а на осях абсцисс – частота сети в герцах. Результаты моделирования полностью соответствуют характеристикам, полученным расчетным путем, что доказывает правильно выбранную методику расчета частотных характеристик.

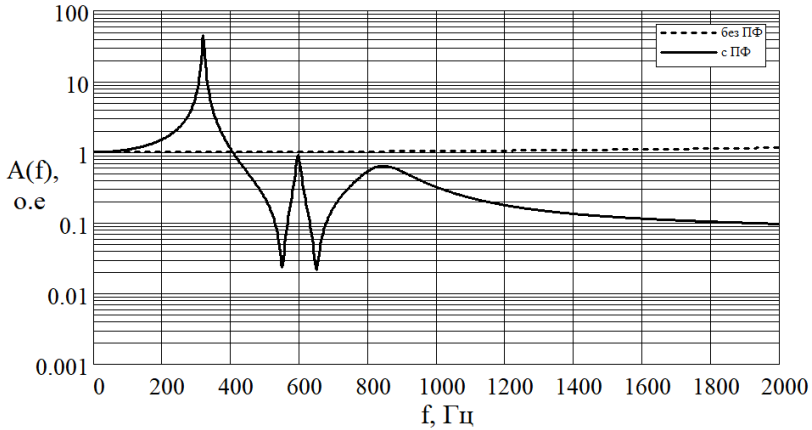


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики сети с ПФ, полученные расчетным путем

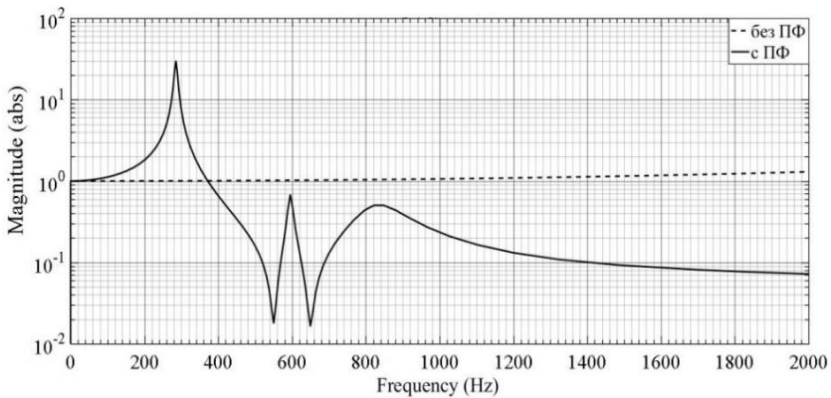


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика сети с ПФ, полученная в результате моделирования

Анализируя амплитудно-частотные характеристики можно сделать вывод, что при использовании данных пассивных фильтров [9] заметно ослабляется уровень 11-й (550 Гц) и 13-й (650 Гц) гармоник, а также значительно снижается уровень гармоник на частотах, начиная с 23-й (1150 Гц). Однако для распространения частот, близких к 5-й гармонике, сеть с ПФ не только не является препятствием, но может значительно увеличить их уровень. Это свидетельствует о резонансных явлениях, возникших вследствие установки пассивных ФКУ.



#### IV. Заключение

Использование пассивных ФКУ в рудничной системе электроснабжения позволяет заметно снизить амплитуды нежелательных высокочастотных гармонических составляющих. Однако, в результате проведенных исследований подтверждено, что пассивные фильтры приводят к возникновению резонансных явлений в системе электроснабжения рудничных подъемных установок, а согласно данным, представленным в [4], можно сделать вывод, что пассивные фильтры также вызывают перекомпенсацию и недокомпенсацию реактивной мощности. Соответственно, в рудничной сети с установленными пассивными фильтрами рекомендуется использовать устройства, позволяющие осуществлять коррекцию частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов. Технически это реализуется с помощью активных и гибридных силовых фильтров высших гармоник [2]. Более перспективны гибридные ФКУ, так как их можно использовать в сетях с уже установленными пассивными ФКУ, что значительно уменьшает стоимость всего устройства.

© Погорелов А.В., 2019

#### Библиографический список

- [1] Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприемниками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 2. С. 75-84.
- [2] Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
- [3] Хворостенко С.В., Авербух М.А. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для ослабления высших гармоник в цеховых сетях электроснабжения с нелинейными потребителями // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1 (5). С. 84-93.
- [4] Прасол Д.А., Погорелов А.В. Анализ работы пассивных фильтров высших гармоник в рудничной системе электроснабжения подъемных установок // Научное развитие технологий и инновации: Междунар. науч. – практ. конф., Белгород, 2019. Ч. 11. С. 39-43. [Электронный ресурс]. URL: [http://conf.bstu.ru/material\\_conf/XXIII\\_nauchnye\\_chteniya](http://conf.bstu.ru/material_conf/XXIII_nauchnye_chteniya) (дата обращения 03.07.2019).
- [5] Авербух М.А., Прасол Д.А., А.В. Погорелов. Минимизация потерь мощности при несинусоидальных режимах в высоковольтных рудничных сетях // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 38-46.
- [6] Прасол Д.А. Особенности имитационного моделирования рудничных высоковольтных сетей при нелинейных потребителях // Борисовские чтения: материалы Всерос. науч.-техн. конф., 17-19 декабря 2017 г. Красноярск, 2017. С 179-182.

- [7] Кирилина О.И., Массов А.А., Плотников С.В., Салтан М.С. Использование имитационного моделирования для выбора и проверки фильтрокомпенсирующих устройств скиповой подъемной установки // *Промышленная энергетика*. 2016. № 11. С. 51-56.
- [8] Семенов А.С., Хубиева В.М., Кугушева Н.Н. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий. М.: Перо, 2015. – 100 с.
- [9] Прасол Д.А. Электромагнитная совместимость в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами постоянного тока: дис. канд. техн. наук, БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2018. – 199 с.

**A.V. Pogorelov**

**RESEARCH OF FREQUENCY RESPONSES  
OF MINE POWER SUPPLY SYSTEM WITH PASSIVE  
FILTER-COMPENSATING DEVICES**

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov  
Belgorod, Russia

**Abstract.** In power supply systems with powerful non-linear electrical receivers, such as thyristor electric drive of skip and cage hoist installations, passive filter-compensating devices are widely used to suppress harmonic components of current and voltage and to compensate reactive power. The article discusses issues of improving the performance of these devices in the power supply systems of mine. To identify the possibility of undesirable resonance phenomena in the power supply systems with passive filters analytically and with the help of simulation modeling, the amplitude-frequency characteristics of the high-voltage power supply systems of the mining enterprise were studied. To analyze the frequency characteristics of the original grid is represented by the equivalent circuit in the form of a passive quadrupole, to simplify which, the method of successive equivalent transformations is used. As a result of the research, it was confirmed that resonance phenomena occur in the electrical grid in connection with the installation of passive filter-compensating devices. On the basis of the data obtained, it was concluded that it was necessary to use devices that allow the correction of the frequency responses of the electrical grid and the elimination of parallel resonances. For this purpose, it is proposed to use active or hybrid filter-compensating devices.

**Keywords:** frequency responses, passive filter-compensating devices, power supply systems of mine, resonant phenomena.

**References**

- [1] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and S.V. Khvorostenko, «Experimental evaluation of mode parameters in high-voltage mine networks with powerful nonlinear electric receivers», *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*, vol. 21, no. 2, pp. 75-84, 2017.

- [2] N.P. Boyarskaya, V.P. Doygun and D.E. Yegorov, *Sintez fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektrosnabzheniya (Synthesis of filter compensating devices for power supply systems)*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2014 (in Russian).
- [3] S.V. Khvorostenko and M. A. Averbukh, «Synthesis of passive filter – compensating devices for attenuation higher harmonics in power supply system of workshop with non-linear consumers», *Smart Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 84-93, 2019.
- [4] D.A. Prasol and A.V. Pogorelov, «Analiz raboty passivnykh fil'trov vysshikh garmonik v rudnichnoi sisteme elektrosnabzheniya pod"emnykh ustanovok (Analysis of the operation of passive filters of higher harmonics in the mine power supply system of lifting installations)», in proc. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii (High technology and innovation)*, Belgorod, 2019, ch. 11. pp. 39-43 [Online]. Available at: [http://conf.bstu.ru/material\\_conf/XXIII\\_nauchnye\\_chteniya](http://conf.bstu.ru/material_conf/XXIII_nauchnye_chteniya) [Accessed: July 3, 2019] (in Russian).
- [5] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and A.V. Pogorelov, «Minimization of power losses upon non-sinusoidal modes of high-voltage mine networks», *Industrial Power Engineering*, vol. 7, pp. 38-46, 2018.
- [6] D.A. Prasol, «Osobennosti imitatsionnogo modelirovaniya rudnichnykh vysokovol'tnykh setey pri nelineynykh potrebitelyakh (Features of simulation of mining high-voltage networks for non-linear consumers) », in proc. *Borisovskie chteniya (Borisov readings)*, Dec. 17-19, 2017, Krasnoyarsk, pp. 179-182 (in Russian).
- [7] O.I. Kirilina, A.A. Massov, S.V. Plotnikov and M.S. Saltan, «Ispol'zovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya vybora i proverki fil'trokompensiruyushchikh ustroystv skipovoi pod"emnoi ustanovki (Using simulation to select and test filter-compensating devices of a skip hoist) », *Industrial Power Engineering*, vol. 11, pp. 51-56, 2016 (in Russian).
- [8] A.S. Semenov, V.M. Khubieva and N.N. Kugusheva, *Modelirovanie rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya gornykh predpriyatiy (Modeling the operation of power supply systems of mining enterprises)*. Moscow: Pero, 2015 (in Russian).
- [9] D.A. Prasol, «*Elektromagnitnaya sovmestimost' v vysokovol'tnykh rudnichnykh setyakh s moshchnimi tiristornymi elektroprivodami postoyannogo toka (Electromagnetic compatibility in high-voltage mine networks with powerful thyristor DC drives)*», Cand. Of Tech. S. thesis, Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, 2018 (in Russian).

УДК 621.317.629.12

Д.В. Умяров

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СУДОВ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

АО КБ «Вымпел», г. Н. Новгород

Предложены математические имитационные модели и инженерная методика расчета коэффициента ТНДи в электроэнергетических системах судов с электродвижением. Применение статических преобразователей электроэнергии в системах электродвижения судов обеспечивает высокие технико-экономические показатели, повышает маневренность судна, позволяет оптимизировать компоновку машинных помещений, обеспечивает снижение совокупного расхода топлива судном. Однако появляется необходимость обеспечивать электромагнитную совместимость мощного статического преобразователя электроэнергии с питающей сетью, управляемым электродвигателем. Современные отечественные инструменты имитационного математического моделирования позволяют на этапе проектирования выполнить оценку величины коэффициента несинусоидальности кривой напряжения и тока. На основе полученных результатов расчета можно сформировать требования к параметрам главных электрических машин (генераторов и двигателей) и выбрать фильтры. Результаты расчета коэффициента гармонических искажений напряжения по имитационным математическим моделям сопоставлены с измерениями в процессе заводских ходовых испытаний судов, в результате чего подтверждена пригодность разработанных моделей для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** гармонические искажения, имитационное математическое моделирование, несинусоидальность, проектирование, спектральный состав, электродвижение, электромагнитная совместимость.

### 1. Введение

Мощность статических преобразователей в системах электродвижения судов близка к мощности генераторов электростанции судна. Руководящими документами предписывается выполнять оценку несинусоидальности кривой напряжения судовой сети, если суммарная мощность, потребляемая статическими преобразователями, превышает 5 % от суммарной полной мощности генераторов [1].

Несинусоидальность потребляемого тока приводит к возникновению на импедансах сети и синхронных генераторов падений напряжения, которые искажают форму напряжения сети. Степень искажения напряжения судовой электроэнергетической системы определяется мощностью статических преобразователей, их схемой, индуктивным сопротивлением генератора и сети высшим гармоникам, глубиной регулирования напряжения и др.

Наличие высших гармоник в напряжении судовой сети негативно сказывается на работе как источников, так и потребителей электроэнергии [1-3]. В электрических машинах высшие гармоники вызывают дополнительные потери, что приводит к повышению общей температуры и местным нагревам. В кабельных линиях высшие гармоники приводят к ускорению процесса старения изоляции и дополнительным потерям в линиях. Под действием высших гармоник может быть нарушена нормальная работа систем защиты и автоматики, возникать ложные срабатывания, сбои в работе устройств синхронизации и автоматического распределения нагрузки. Негативно воздействуют высшие гармоники и на сами статические преобразователи, ухудшаются условия коммутации, возникают сбои в системе управления, что может увеличивать пульсации на стороне выпрямленного тока.

## **II. Обеспечение электромагнитной совместимости на этапе проектирования**

На этапе проектирования судов требуется проверить соответствие системы электродвижения требованиям, предъявляемым Российским морским регистром судоходства. Одной из важнейших характеристик системы электродвижения является электромагнитная совместимость установки с судовой сетью. Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства, коэффициент гармонических искажений напряжения не должен превышать 10 % [1, 2].

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_c$  – действующее напряжение сети;  $U_n$  – напряжение гармонической составляющей  $n$ -го порядка;  $n$  – порядок высшей гармонической составляющей.

В настоящее время для оценки коэффициента гармонических искажений напряжения используются имитационные математические модели. Математические модели позволяют провести количественную и каче-

ственную оценку работы гребной электроустановки, а в ряде случаев сопоставить результаты моделирования с данными, полученными на существующих образцах альтернативных систем. Моделирование также дает возможность опробовать и отработать новые технические решения без создания прототипов.

### III. Краткий обзор современных систем электродвижения

В настоящее время электрические гребные установки применяются преимущественно на следующих типах судов: круизные суда, паромы, буровые суда с системой динамического позиционирования, плавучие нефтедобывающие платформы, танкеры, кабелеукладочные суда, трубоукладчики, ледоколы и другие ледоходные суда, суда снабжения и вспомогательные суда военно-морского флота. В настоящее время проводятся также исследования и оценка возможности использования электрических гребных установок в проектировании новых судов для существующих и новых областей применения. Классификационная структура систем электродвижения показана на рис. 1.

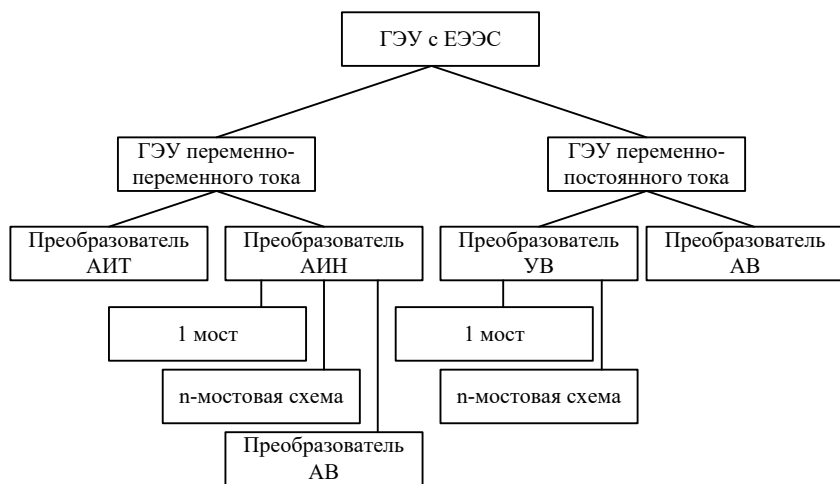


Рис. 1. Классификационная структура статических преобразователей в системах электродвижения судов:

ГЭУ – гребные электроустановки; ЕЭЭС – единые электроэнергетические системы;

АИТ – автономный инвертор тока; АИН – автономный инвертор напряжения;

УВ – управляемый выпрямитель; АВ – активный выпрямитель

Ниже кратко описаны наиболее часто встречающиеся структуры систем электродвижения судов среднего и большого водоизмещения.



Данная структура позволяет сохранить гребной двигатель и движитель, сохранить параметры главных двигателей и обслуживающих систем. Новое оборудование пропульсивной установки может быть размещено в существующих помещениях судна без значительной реконструкции корпуса судна.

Недостатком данной структуры является сравнительно большое значение коэффициента гармонических искажений напряжения судовой сети ТНДu, сравнительно большие потери электроэнергии и сравнительно низкий коэффициент мощности гребной электроустановки особенно на малых скоростях хода судна.

Система электродвижения (СЭД) переменного тока с 12-пульсным выпрямителем и согласующим трансформатором показана на рис. 3.

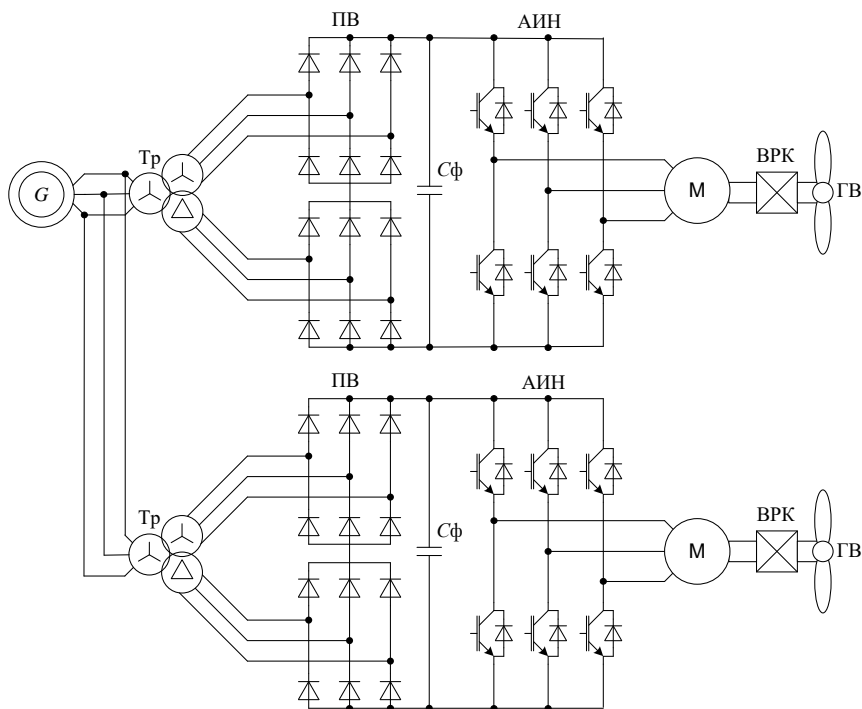


Рис. 3. Система электродвижения буксира-спасателя мощностью 4 МВт с двухуровневым инвертором и 12-пульсным выпрямителем:  
 Тр – трансформатор; ПВ – пассивный выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; ВПК – винторулевая колонка; ГВ – гребной винт



В основе схемы лежит наиболее распространенный тип преобразователей частоты с пассивным выпрямителем (ПВ) и двухуровневым инвертором напряжения, работающим в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этой схеме две трехфазные мостовые схемы, фазные ЭДС которых сдвинуты на  $30^\circ$  из-за разных схем соединений вторичных обмоток трансформатора, работают на общую нагрузку. Это улучшает форму общего тока, потребляемого из сети. В результате пульсации на нагрузке становятся 12-кратными, а 5-я и 7-я низшие гармоники первичных токов каждого из мостов взаимно компенсируются в общем токе, потребляемом из сети. Низшими гармониками, генерируемыми в сеть, становятся 11-я и 13-я [1]. Достоинством схемы является относительная простота. К недостаткам относятся большие масса, габариты, тепловыделения.

Многоуровневые преобразователи частоты применяются в системах электродвижения большой (более 7 МВт) мощности судов большого водоизмещения, как рациональное решение задачи эффективного обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя с двигателем и с судовой сетью [1]. Схема электроэнергетической системы ледокола мощностью 15 МВт с системой электродвижения на базе многоуровневого преобразователя частоты показана на рис. 4.

За счет большего количества уровней фазного напряжения инвертора его форма близка к синусоидальной, входной и выходной ток также практически синусоидальный. Увеличение количества уровней выходного напряжения требует увеличения количества силовых ключей и приводит к увеличению тепловыделений, массы и габаритов преобразователя и системы электродвижения в целом.

СЭД с преобразователями частоты с активным выпрямителем напряжения (АВН) хорошо зарекомендовала себя на судах с высоким ледовым классом (рис. 5). Активные выпрямители напряжения позволяют потреблять из сети ток заданной формы и обеспечивать при регулировании  $\cos\varphi \approx 1,0$ . Значительным достоинством конструкции систем электродвижения на базе этих преобразователей является отсутствие согласующего трансформатора на входе, что снижает массу, габариты и тепловыделения такой системы электродвижения в целом.

#### **IV. Математическая имитационная модель единой электроэнергетической системы судна с электродвижением**

На этапе разработки технического проекта составляется имитационная математическая модель судовой электроэнергетической системы. Она может быть сформирована в среде схемотехнического моделирования, в качестве которой выбрана перспективная отечественная система SimInTech.

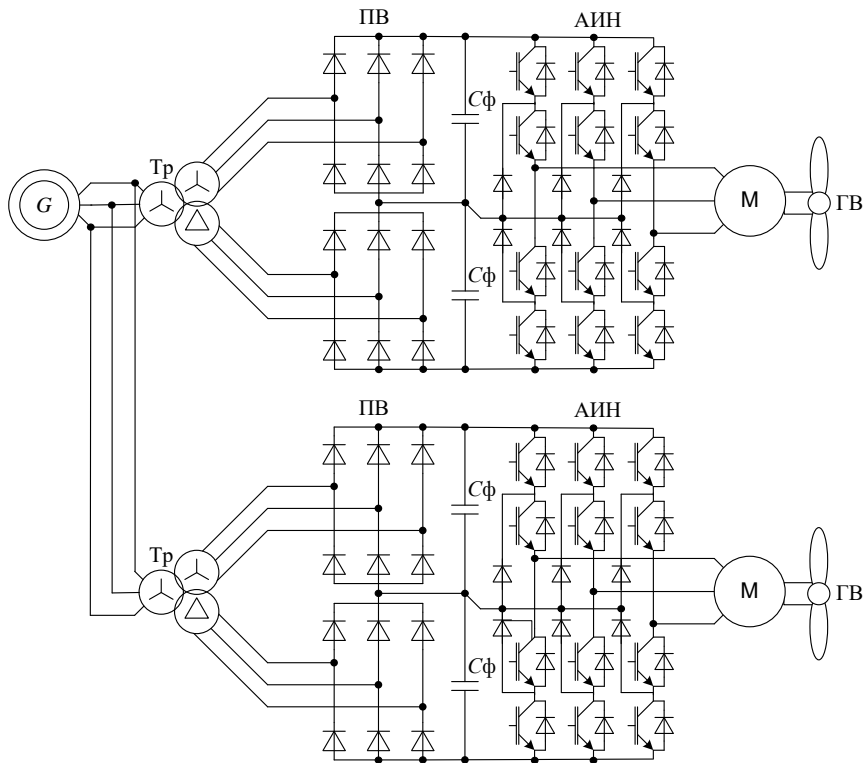


Рис. 4. Система электродвижения ледокола мощностью 15 МВт с трехуровневым преобразователем частоты:

Tr – трансформатор; ПВ – пассивный выпрямитель;  
АИН – автономный инвертор напряжения; ГВ – гребной винт

SimInTech – среда модельно ориентированного проектирования систем автоматического управления, создания математических моделей, алгоритмов и интерфейсов управления, а также автоматической генерации кода для программируемых контроллеров и графических дисплеев. Среда схемотехнического моделирования содержит библиотеки моделей элементов судовой электроэнергетической системы и типовые модели систем и обеспечивает передачу топологии набранной схемы с параметрами элементов в программы комплексного программного обеспечения. Программа позволяет выполнить анализ электромагнитных и электромеханических процессов [1].

При создании имитационной математической модели принимаются допущения. Допущения в математических моделях электрических маши-

нах: отсутствует насыщение; опускаются индуктивности намагничивания и собственные емкости трансформаторов; отсутствуют потери мощности на вихревые токи и гистерезис, отсутствует гистерезис и вытеснение тока в обмотках; синусоидальное распределение в пространстве намагничивающей силы и магнитной индукции; независимость индуктивностей рассеяния от положения ротора; полная симметрия статора. Допущения в математических моделях статических преобразователей: не учитываются собственные емкости вентилялей; не учитываются индуктивности и активные сопротивления конденсаторов; не учитываются индуктивности и активные сопротивления соединительных проводов. Перечисленные допущения позволяют сохранить действительную картину процессов, протекающих в системе.

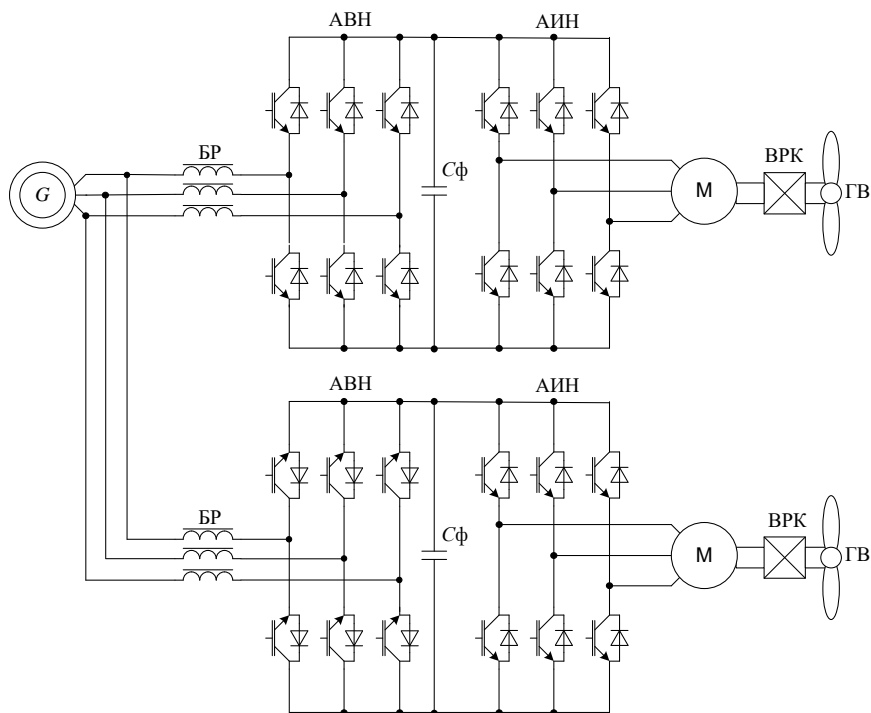


Рис. 5. Система электродвижения ледокола мощностью 7 МВт с преобразователем частоты с активным выпрямителем напряжения: БР – реактор; АИВ – активный выпрямитель; АИИ – автономный инвертор напряжения; ВРК – винторулевая колонка; ГВ – гребной винт

На рис. 6 показан фрагмент имитационной математической модели электроэнергетической системы судна с электродвижением в среде SimInTech, а на рис. 7 – график расчетной кривой напряжения судовой сети при работе системы электродвижения в установившемся режиме и фрагмент диалогового окна инструмента «Спектральный анализ».

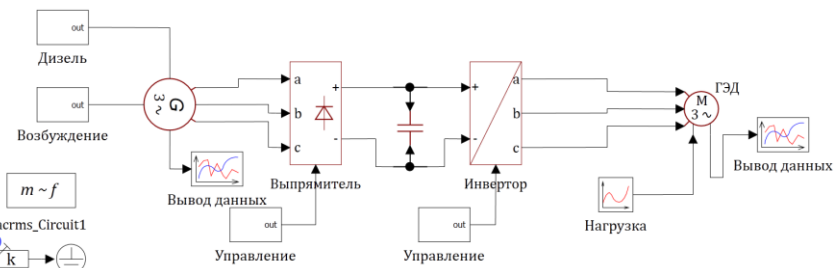


Рис. 6. Фрагмент имитационной математической модели единой электроэнергетической системы судна с электродвижением

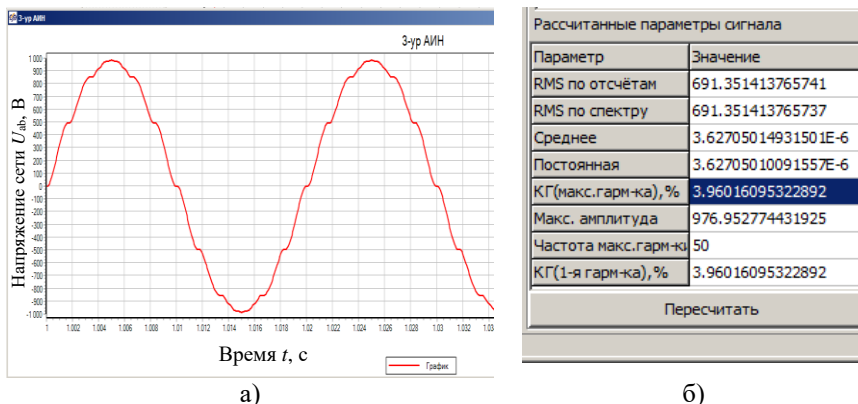


Рис. 7. Расчетная кривая напряжения судовой сети при работе 3-уровневого преобразователя частоты (а) и фрагмент диалогового окна инструмента «Спектральный анализ» в SimInTech (б)

Разработанные имитационные математические модели позволяют выполнять расчетную оценку основного критерия качества электроэнергии судовой сети – коэффициента гармонических искажений напряжения. Обобщая опыт постройки судов с различными типами систем электродвижения, можно сравнить последние по нескольким критериям: удельная масса системы (кг/кВт); удельный объем системы ( $\text{м}^3/\text{МВт}$ ); потери (% от мощности двигателя) и величина искажений напряжения судовой сети

*THD*. Данные показатели для рассмотренных структур систем электродвижения (СЭД) представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Сравнение вариантов гребных электроустановок

Показатель	СЭД ~/= тока с УВ		СЭД ~ тока с преобразователем частоты с неуправляемым 12-пульсным выпрямителем и 2-х уровневый инвертором	СЭД ~ тока с 3-х уровневый инвертором	СЭД ~ тока с ПЧ с АВН
	расчет	опыт			
Удельная масса системы, кг/кВт	22,0		9,5	7,1	6,6
Удельный объем системы, м <sup>3</sup> /МВт	25,2		12,9	18,1	10,1
Частота ШИМ инвертора, Гц	–		2000	1000	1000
Искажения напряжения судовой сети THDu, %	расчет	8,1	7,0	3,3	2,3
	опыт	8,7	8,1	3,8	2,6
Потери (% от мощности двигателя)	13,9		9,88	9,182	9

Данная информация полезна при проектировании новых судов и выборе типа и структуры системы электродвижения.

#### В. Заключение

1. Предложенные математические имитационные модели и инженерная методика расчета коэффициента THDu в электроэнергетических системах судов с электродвижением отличаются от существующих следующим: учитывается, что мощность статических преобразователей систем электродвижения близка к мощности генераторов электростанции; длина линий электропередач между источниками и потребителями мала (сопротивление линии передачи менее 0,5 % от сопротивления генератора); учитывается несимметричность по продольной и поперечной осям магнитного сопротивления синхронного генератора.

2. Выполнен сравнительный анализ различных топологий электроэнергетической системы судна с системой электродвижения по критериям удельной массы киловатта полезной мощности, удельного объема пространства киловатта полезной мощности, удельным потерям

электроэнергии на один киловатт полезной мощности, величине коэффициента ТНДu несинусоидальности кривой напряжения в судовой силовой распределительной сети. Показано, что системы электродвижения до 7 МВт/1 кВ целесообразно строить на базе преобразователя частоты с активным выпрямителем, более 7 МВт/1 кВ – на базе ПЧ с многоуровневым инвертором.

3. Экспериментальными исследованиями на судах в процессе их ходовых испытаний подтверждена достоверность результатов расчетов, выполненных с использованием разработанных автором математических имитационных моделей.

© Умяров Д.В., 2019

### Библиографический список

- [1] РД 5.6130. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета коэффициента несинусоидальности кривой напряжения.
- [2] Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990. – 263 с.
- [3] Грунтович Н.В. Анализ влияния высших гармоник на надежность эксплуатации кабельных линий // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции. Декабрь 22, 2011, Нижний Новгород, Россия. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. С. 75-79.
- [4] Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. Москва: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
- [5] Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI «Электрооборудование», 2018. – 226 с.
- [6] Шейнхович В.В., Климанов О.Н., Пайкин Ю.И., Зубарев Ю.Я. Качество электрической энергии на судах: Справочник. Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
- [7] Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- [8] Храмшин Р.Р., Храмшин Т.Р., Храмшина Е.А., Корнилов Г.А. Многоуровневый высоковольтный преобразователь частоты для электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 3. С. 191-196.
- [9] Sim In Tech – среда создания математических моделей. [Электронный ресурс]. URL: <http://simintech.ru/> (дата обращения 18.09.2019).

D.V. Umiarov

## ENSURING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRIC RECEIVERS IN POWER SYSTEMS OF VESSELS WITH ELECTRIC MOTION AT DESIGN STAGE

JSC DO «Vypel»  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The use of static electric power converters in ship electric propulsion systems provides high technical and economic indicators, increases the maneuverability of the ship, allows optimizing the layout of engine rooms, and reduces the total fuel consumption of the ship. However, it becomes necessary to ensure electromagnetic compatibility of a powerful static power converter with a power supply controlled by an electric motor. Modern domestic tools of simulation mathematical modeling allow to evaluate the value of the coefficient of non-sinusoidality of the voltage and current curves at the design stage. Based on the obtained calculation results, it is possible to formulate requirements for the parameters of the main electrical machines (generators and motors), and select filters parameters. Comparison of the results of calculating the harmonic distortion coefficient of the voltage using simulation mathematical models with measurements in the process of factory ship sea trials confirms the suitability of the developed models for engineering calculations.

**Keywords:** design, electromagnetic compatibility, electric motion, harmonic distortion, non-sinusoidality, simulation mathematical modeling, spectral composition.

### References

- [1] RD 5.6130. Sudovyie elektroenergeticheskiye sistemy. Metody rascheta koefitsiyenta nesinusoidal'nosti krivoy napryazheniya. (RD 5.6130. Ship electric power systems. Methods for calculating the coefficient of non-sinusoidality of the voltage curve) (in Russian).
- [2] Ya.F. Anisimov and E.P. Vasiliev, *Elektromagnitnaya sovместimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok (Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and marine electrical installations)*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1990 (in Russian).
- [3] N.V. Gruntovich, «Analiz vliyaniya vysshikh garmonik na nadezhnost' ekspluatatsii kabel'nykh liniy (Analysis of the influence of higher harmonics on the reliability of cable lines operation) », in proc. *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki (Actual problems of the electric power industry)*, 2011 (in Russian).
- [4] A. Kusko and M.T. Thompson, *Power quality in electrical systems*. McGraw-Hill, 2007.
- [5] Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. XI «Elektrooborudovaniye» («Russian Maritime Register of Shipping.

- Rules for the classification and construction of ships. Part XI. Electrical Equipment», 2018 (in Russian).
- [6] V.V. Sheinkhovich, O.N. Klimanov, Yu.I. Paykin and Yu.Ya. Zubarev, *Kachestvo elektricheskoy energii na sudakh: Spravochnik (Electric Energy Quality on Ships)*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1988 (in Russian).
- [7] M.V. Gelman, M.M. Dudkin and K.A. Preobrazhenskiy, *Preobrazovatel'naya tekhnika (Conversion technology)*. Chelyabinsk: Publishing Centre SUSU, 2009 (in Russian).
- [8] R. Hramshin, T. Hramshin, E. Hramshina, G. Kornilov, «The multilevel high-voltage converter of frequency for the electric drive», *News of the Tula state university. Technical sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 191-196, 2010.
- [9] Sim In Tech is a mathematical model creation environment. [Online]. Available at: <http://simintech.ru/> [Accessed: Sept. 18, 2019].



УДК 621.3.064

Л.А. Герман <sup>1</sup>, А.С. Серебряков <sup>2</sup>, В.Л. Осокин <sup>2</sup>

## СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОДСТАНЦИИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ПИТАНИИ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ УСТАНОВКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

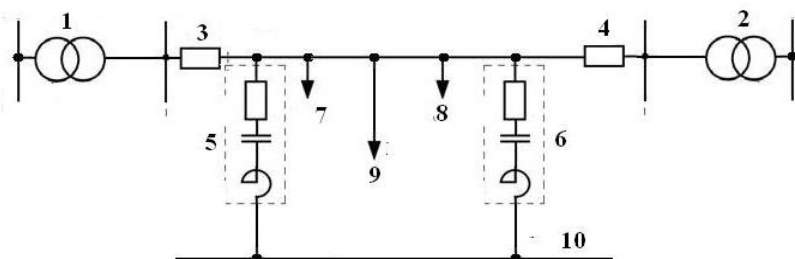
<sup>1</sup> Самарский государственный университет путей сообщения<sup>2</sup> Нижегородский государственный  
инженерно-экономический университет

При необходимости снижения повышенных значений уравнильного тока в тяговой сети применяют раздел по контактной сети с помощью нейтральной вставки у смежной тяговой подстанции. В этом случае одна питающая подстанция осуществляет одностороннее питание контактной сети, в конце которой включена нерегулируемая установка компенсации реактивной мощности (УКРМ). Тогда при снижении тяговой нагрузки повышается напряжение в тяговой сети, а также на шинах конденсаторной установки и отключенной тяговой подстанции. Для решения данной проблемы предложены два инструмента. Во-первых, способ регулирования напряжения на питающей тяговой подстанции путем изменения позиции устройства регулирования напряжения под нагрузкой (УРПН) тягового трансформатора (при одностороннем питании тяговой сети переменного тока с нерегулируемой УКРМ, включенной в конце этого участка. Позиция УРПН определяется на основании расчета напряжения в конце участка. Расчет делается на основании измеренных параметров в начале участка. Во-вторых, алгоритм определения позиции УРПН трансформатора, обеспечивающий нормализацию напряжения на УКРМ для всех режимов работы. Техничко-экономический эффект достигается за счет нормализации напряжения на УКРМ и повышения надежности ее работы.

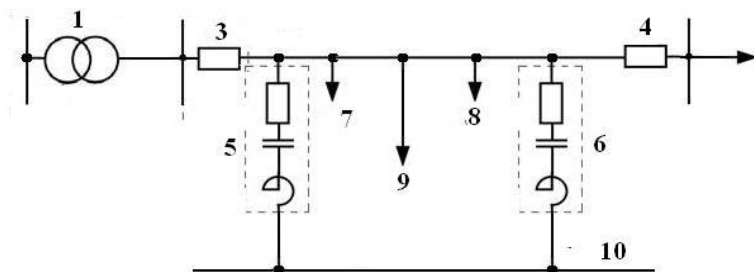
**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, математическое моделирование, MATHCAD, одностороннее питание сети переменного тока, регулирование напряжения трансформатора, тяговая сеть.

### 1. Введение

В системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта в большинстве случаев применяют двухстороннее питание электрифицированных участков железных дорог с включением на тяговых подстанциях установок поперечной емкостной компенсации – конденсаторных установок (КУ) (рис. 1, а).



а.



б.

Рис. 1. Схема питания электрифицированного участка железной дороги с двухсторонним (а) и односторонним (б) питанием:  
 1 и 2 – трансформаторы для питания тяговой сети на первой и второй подстанциях;  
 3 и 4 – выключатели питающих линий контактной сети;  
 5 и 6 – установки нерегулируемой поперечной емкостной компенсации;  
 7 и 8 – реальная распределенная тяговая нагрузка;  
 9 – эквивалентная сосредоточенная тяговая нагрузка; 10 – рельс.

В ряде случаев, например, при необходимости снижения повышенных значений уравнивающего тока в тяговой сети [1], применяют раздел по контактной сети с помощью нейтральной вставки у смежной тяговой подстанции, отключая выключатель 4 и оставляя на этой подстанции установку поперечной емкостной компенсации 6. Это значит, что одна питающая подстанция осуществляет одностороннее питание контактной сети, в конце которой включена КУ (рис. 1, б). Основной недостаток такой схемы заключается в том, что при снижении тяговой нагрузки, и в предельном случае при полном ее отсутствии, повышается напряжение в тяговой сети и на шинах КУ отключенной тяговой подстанции.

При мощности КУ 5-7 Мвар напряжение в конце консольного участка повышается на 2-3 кВ, что может привести к повышению напряжения в контактной сети сверх допустимой нормы – 29 кВ. Решение в

этом случае известное – КУ должна быть регулируемой или отключаемой. Однако включение и отключение КУ также связано с возникновением значительных перенапряжений на конденсаторах.

В [2] предложена регулируемая переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ), но ее промышленное производство пока не осуществлено. Статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) на базе статического компенсатора (СТАТКОМ) с управляемыми силовыми транзисторами *IGBT* [2] и [3] имеют высокую стоимость. Стоимость таких установок мощностью в 10 Мвар составляет около 100 млн руб., поэтому массовое внедрение их в ближайшее время вряд ли будет реализовано. В то же время, на отечественных железных дорогах в настоящее время применяются нерегулируемые конденсаторные установки поперечной емкостной компенсации (более 250 установок на сети), стоимость которых на порядок меньше стоимости СГРМ. Поэтому в современных условиях возникает задача обеспечения допустимого режима работы тяговой сети в самом неблагоприятном случае по режиму напряжения при одностороннем питании и с применением существующих нерегулируемых КУ. Отметим, что рассматриваемый способ может быть применен в ряде случаев и для тяговой сети с двухсторонним питанием.

## II. Постановка задачи исследования

Установки поперечной емкостной компенсации реактивной мощности представляют собой батарею конденсаторов, последовательно с которой включается реактор (рис. 1). Вывод батареи конденсаторов подключается к шинам тяговой подстанции, а вывод реактора через демпфирующий резистор подключается к рельсу. Колебательный *CL* контур описываемой установки поперечной емкостной компенсации настраивается на частоту наиболее ярко выраженной в тяговой сети третьей гармоники с небольшой расстройкой – 142 Гц. Конденсаторы КУ очень чувствительны к повышению напряжения. Срок службы их при этом резко сокращается, а вероятность выхода из строя увеличивается. Поэтому перенапряжения на конденсаторах недопустимы [4]. С другой стороны, при снижении тяговой нагрузки и наличии КУ напряжение на конденсаторах КУ неизбежно возрастает. В случае нерегулируемой КУ единственным способом снижения напряжения в тяговой сети и на КУ является регулирование напряжения на выводах питающего тягового трансформатора 1 (рис. 1) с помощью устройства регулирования напряжения под нагрузкой (УРН). Следовательно, при снижении тяговой нагрузки напряжение на шинах питающей подстанции должно снижаться настолько, чтобы напряжение на КУ в конце тяговой сети было бы не выше 29 кВ. При этом напряжение на шинах КУ непосредственно не измеряется, так как расстояние между подстанциями составляет порядка 50 км. Следовательно, значение этого напряжения

необходимо точно вычислить, используя измеренные значения параметров на стороне питающей подстанции.

Цель проведенного исследования – выбрать и обосновать способ регулирования напряжения на тяговой подстанции при одностороннем питании тяговой сети переменного тока с нерегулируемой установкой компенсации реактивной мощности (КУ), включенной в конце этого участка, путем изменения позиции УРПН тягового трансформатора. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: используя измеренные значения параметров на стороне питающей подстанции, определить напряжение в конце участка тяговой сети с консольным питанием и по его значению определить требуемую позицию УРПН.

### III. Математическая модель и принятые допущения

Заменим распределенную тяговую нагрузку 7 и 8 на рис. 1 одной эквивалентной сосредоточенной нагрузкой 9. Схема замещения такой тяговой сети при одностороннем питании приведена на рис. 2.

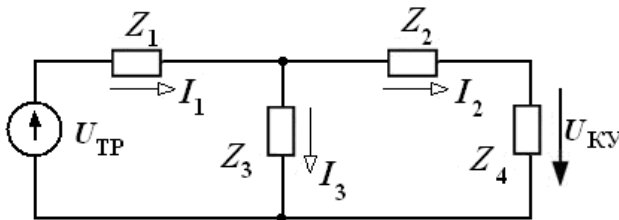


Рис. 2. Схема замещения тяговой сети при одностороннем питании

Здесь резисторы:  $Z_1 = R_1 + j \cdot X_1$  и  $Z_2 = R_2 + j \cdot X_2$  – эквивалентные сосредоточенные комплексные сопротивления тяговой сети соответственно от питающей подстанции до эквивалентной нагрузки и от эквивалентной нагрузки до КУ;  $Z_3 = R_3 + j \cdot X_3$  – комплексное эквивалентное сопротивление сосредоточенной эквивалентной тяговой нагрузки;  $Z_4 = -j \cdot X_C$  – комплексное сопротивление КУ с емкостным сопротивлением  $X_C$ ;  $U_{TP}$  – напряжение на выводах тяговой обмотки питающего трансформатора, снабженного устройством регулирования напряжения под нагрузкой.

Система уравнений для создания математической модели исследуемой сети и нахождения с ее помощью токов в схеме на рис. 2, имеет вид:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (1)$$

$$Z_1 \cdot I_1 + Z_3 \cdot I_3 = U_{TP}; \quad (2)$$

$$(Z_2 + Z_4) \cdot I_2 - Z_3 \cdot I_3 = 0. \quad (3)$$

Все величины в уравнениях (1)-(3) имеют комплексные значения, но ради упрощения, они записаны без подчеркивания. Напряжение в тяговой сети в точке подключения эквивалентной сосредоточенной нагрузки определяется как  $U_3 = Z_3 \cdot I_3$ , а напряжение на КУ как  $U_{КУ} = Z_4 \cdot I_2$ .

Необходимо отметить, что с помощью имеющихся измерительных приборов на питающей подстанции можно измерить лишь напряжение  $U_{ТР}$  на выводах тягового трансформатора и ток фидера  $I_1$ . Токи  $I_2$  и  $I_3$  не измеряются, они неизвестны. Тем не менее, необходимость и польза создания математической модели по уравнениям (1)-(3) заключается в том, чтобы по ней можно по заданной тяговой нагрузке точно определить ток фидера, ток КУ и напряжение на КУ. После этого можно определить погрешность определения заданных искомым величин по неполным измеренным данным.

На рис. 3 приведено решение системы уравнений (1)-(3) в интегрированном пакете MATHCAD [5]. Исходные данные параметров исследуемой тяговой сети, активные и реактивные сопротивления элементов и напряжение на шинах подстанции, также приведены на рис. 3.

$$\begin{aligned}
 i &:= \sqrt{-1} & U_{ТР} &:= 27500 & Z_1 &:= 2.5 + 7.5i & Z_2 &:= Z_1 \\
 n &:= 3 & \text{н-нагрузочный коэффициент} & & Z_3 &:= (100 + 75 \cdot i) \frac{1}{n} \\
 Z &:= \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ Z_1 & 0 & Z_3 \\ 0 & Z_2 + Z_4 & -Z_3 \end{pmatrix} & U &:= \begin{pmatrix} 0 \\ U_{ТР} \\ 0 \end{pmatrix} & Z_4 &:= -156 \cdot i \\
 I &:= Z^{-1} \cdot U & I &= \begin{pmatrix} 452.782 - 242.155i \\ 21.568 + 164.969i \\ 431.213 - 407.124i \end{pmatrix} & |\vec{I}| &= \begin{pmatrix} 513.469 \\ 166.373 \\ 593.039 \end{pmatrix} \\
 U_3 &:= I_2 \cdot Z_3 = 2.455 \times 10^4 - 2.79i \times 10^3 & |U_3| &= 2.471 \times 10^4 \\
 U_{КУ} &:= I_1 \cdot Z_4 = 2.574 \times 10^4 - 3.365i \times 10^3 & |U_{КУ}| &= 2.595 \times 10^4
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Определение параметров сети с односторонним питанием в интегрированном пакете MATHCAD

Нагрузка тяговой сети задается с помощью нагрузочного коэффициента  $n$ . Значение коэффициента  $n$  зависит от количества составов, их массы и скорости движения. В результате расчета напряжение на КУ получилось равным 25,95 кВ, а напряжение на эквивалентной нагрузке – 24,71 кВ.

На первой подстанции с тяговым трансформатором 1 с помощью штатных измерительных приборов измеряются мгновенные значения тока  $i$  и напряжения  $U_{\text{ТР}}$  и вычисляется измеренная активная  $P_1$  и измеренная реактивная  $Q_1$  мощности тяговой обмотки, а также действующее значение напряжения  $U_{\text{ТР}}$ . Далее специальный многофункциональный расчетный блок рассчитывает напряжение на шинах КУ по выражению [6]:

$$U_{\text{КУ}} = U_{\text{ТР}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{ТР}}} + \frac{(Q_{\text{КУ}} \cdot X_2)}{U_{\text{КУ}}}. \quad (4)$$

Третье слагаемое  $Q_{\text{КУ.НОМ}} X_{\text{тс.к}} / U_{\text{КУ}}$  в формуле (4) показывает потерю напряжения со знаком «-» от действия КУ на левой половине всей зоны, то есть, за счет третьего слагаемого, напряжение на КУ повышается. Следует обратить внимание на учет потерь напряжения за счет третьего слагаемого только на второй половине участка, так как на первой половине расчет потерь напряжения выполнен уже с учетом КУ.

В формуле (4) значения  $U_{\text{КУ}}$  и  $Q_{\text{КУ}}$  неизвестны. В первом приближении можно подставить их номинальные значения  $Q_{\text{КУ.НОМ}} = 4 \cdot 10^6$  Мвар и  $U_{\text{ТР}} = 27,5$  кВ и рассчитать напряжение  $U_{\text{КУ}}$ :

$$\begin{aligned} U_{\text{КУ}} &= U_{\text{ТР}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{ТР}}} + \frac{(Q_{\text{КУ.НОМ}} \cdot X_2)}{U_{\text{ТР}}} = \\ &= U_{\text{ТР}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1 + Q_{\text{КУ.НОМ}} \cdot X_2)}{U_{\text{ТР}}} = \\ &= 27500 - \frac{(1,245 \cdot 10^7 \cdot 2,5 + 6,659 \cdot 10^6 \cdot 7,5 + 4 \cdot 10^6 \cdot 7,5)}{27500} = \\ &= 25640 \text{ В} = 25,64 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Погрешность вычисления по сравнению с точными расчетами, приведенными на рис. 3, составляет 1,195 %. Эту погрешность можно сократить, если уравнение (4) решать в интегрированном пакете MATCAD итерационным методом с использованием функции `root`, предварительно задав начальное приближение:

$$\begin{aligned}
 &U_{\text{кв}} = 1 \\
 &\text{root} \left( U_{\text{кв}} - U_{\text{тп}} + \frac{P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1}{U_{\text{тп}}} - \frac{Q_{\text{кв.ном}} \cdot X_2}{U_{\text{кв}}}, U_{\text{кв}} \right) = \\
 &= 25720 \text{ В} = 25,72 \text{ кВ}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

В этом случае погрешность составляет 0,886 %.

Более точные результаты можно получить, если формулу (4) представить в виде:

$$U_{\text{кв}} = U_{\text{тп}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{тп}}} + \frac{(U_{\text{кв}} \cdot X_2)}{X_c}. \tag{7}$$

Отсюда напряжение на КУ можно выразить, как:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{кв}} &= \frac{U_{\text{тп}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{тп}}}}{1 - \frac{X_2}{X_c} U_{\text{тп}}} = \\
 &= \frac{27500 - \frac{(1,245 \cdot 10^7 \cdot 2,5 + 6,659 \cdot 10^6 \cdot 7,5)}{27500}}{1 - \frac{7,5}{156} \cdot 27500} = \\
 &= 25790 \text{ В} = 25790 \text{ кВ}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Погрешность по формуле (8) получается равной 0,617 %. Именно эту формулу и применяем для расчета напряжения на КУ. Такую же погрешность дает использование в интегрированном пакете MATHCAD стандартной функции Given (рис. 4). Это минимальная методическая погрешность.

$$\begin{aligned}
 &\textbf{Given} \\
 &\textbf{Uku} = \left( \textbf{UT} - \frac{\textbf{P} \cdot \textbf{R1} + \textbf{Q} \cdot \textbf{X1}}{\textbf{UT}} \right) + \frac{\textbf{Uku} \cdot \textbf{X2}}{\textbf{Xc}} \\
 &\textbf{Uku} > 0 \\
 &\textbf{Find}(\textbf{Uku}) = 2.579 \times 10^4
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Использование стандартной функции Given в интегрированном пакете MATHCAD

#### IV. Результаты исследований

На рис. 5. приведены зависимости напряжения вдоль тяговой сети от тяговой нагрузки. Тяговая нагрузка в процентах от номинальной составляет: 1-100 %, 2-66 %, 3-33 %, 4-16 %, 5-0 %. На рис. 6 приведены зависимости тока  $I_1$  фидера, питающего подстанции, и тока  $I_2$  компенсирующей установки, от тока тяговой нагрузки  $I_3$ .

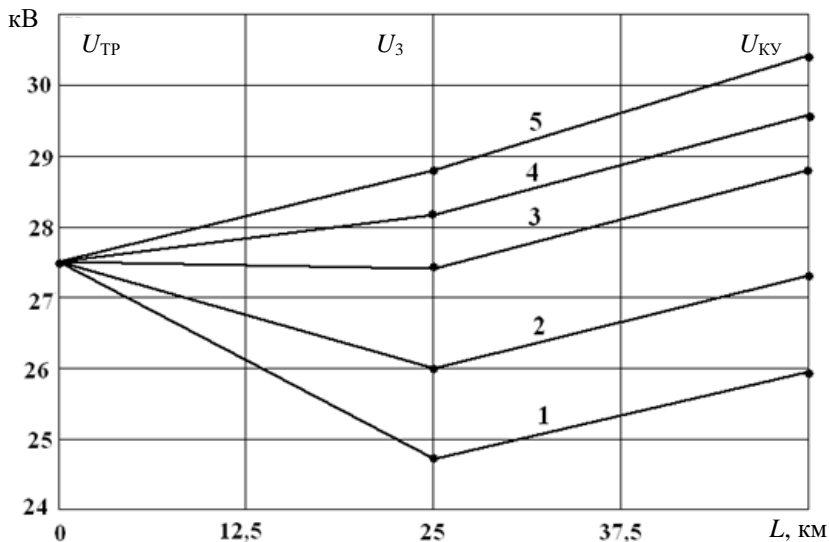


Рис. 5. Зависимости напряжения вдоль тяговой сети от тяговой нагрузки. Тяговая нагрузка составляет: 1 – 100 %, 2 – 66 %, 3 – 33 %, 4 – 16 %, 5 – 0 %

Как видно из рис. 5, напряжение вдоль электрифицированного участка в левой половине может понижаться или повышаться в зависимости от значения тяговой нагрузки. При больших тяговых нагрузках напряжение понижается, а при малых нагрузках, за счет включенной КУ, возрастает. Напряжение вдоль электрифицированного участка в правой половине повышается всегда независимо от значения тяговой нагрузки и может значительно превосходить допустимое значение 29 кВ.



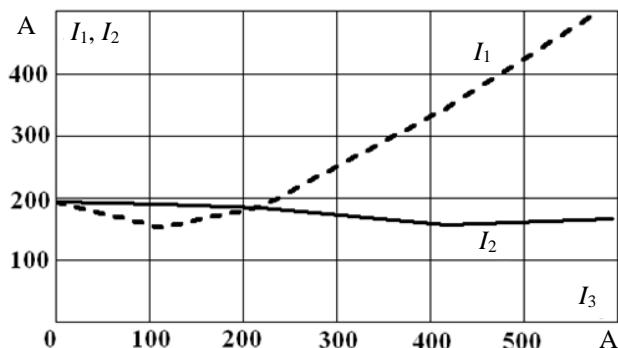


Рис. 6. Зависимости тока  $I_1$  фидера и тока  $I_2$  от тока тяговой нагрузки  $I_3$

После определения напряжения на шинах КУ алгоритм регулирования напряжения строим следующим образом. При напряжении на шинах КУ более 29 кВ с помощью УРПН понижаем напряжение на трансформаторе так, чтобы напряжение на шинах КУ было 28-29 кВ.

Далее, при напряжении на шинах КУ 27-28 кВ, с помощью УРПН стабилизируем напряжение  $U_{тр}$  на уровне 25-26 кВ. Если напряжение на шинах КУ установится 27 кВ и ниже, то напряжение на трансформаторе  $U_{тр}$  стабилизируем на уровне 27-28 кВ.

Технико-экономический эффект связан с решением задачи осуществления одностороннего (консольного) питания контактной сети с включением нерегулируемой установки компенсации реактивной мощности в конце консольного участка. При этом регулирование мощности установки компенсации осуществлено с помощью УРПН трансформатора питающей подстанции.

## V. Заключение

Предложен способ регулирования напряжения на подстанции при одностороннем питании сети переменного тока с нерегулируемой установкой компенсации реактивной мощности в конце консольного участка. Напряжение на шинах КУ с необходимой точностью рассчитывается по измеренным данным на выходе питающей подстанции. Предложен алгоритм определения позиции УРПН трансформатора, обеспечивающий нормализацию напряжения на КУ для всех режимов работы.

Технико-экономический эффект определяется тем, что за счет нормализации напряжения на КУ повышается надежность ее работы.

© Герман Л.А., 2019

© Серебряков А.С., 2019

© Осокин В.Л., 2019

**Библиографический список**

- [1] Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2018. № 77 (5). С. 288-294.
- [2] Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Княгинино: НГИЭУ, 2017. – 402 с.
- [3] Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Мизинцев А.В., Якунин Д.В. Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с биполярным тиристорным ключом // Электроника и Электрооборудование Транспорта. 2014. № 4. С. 24-29.
- [4] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: ГОУ «УМЦ», 2009. – 604 с.
- [5] Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [6] Серебряков А.С., Шумейко В.В. MATHCAD и решение задач электротехники. М.: Маршрут, 2005. – 240 с.

**L.A. German<sup>1</sup>, A.S. Serebryakov<sup>2</sup>, V.L. Osokin<sup>2</sup>**

**METHOD FOR REGULATING VOLTAGE  
AT SUBSTATION WITH SINGLE-SIDED POWER SUPPLY  
OF AC NETWORK WITH UNREGULATED  
POWER FACTOR CORRECTION DEVICE**

<sup>1</sup> The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
Knyaginino, Russia

**Abstract.** The section on the contact network using a neutral insert at an adjacent traction substation is used to reduce the increased values of the equalizing current in the traction network. In this case, one power substation provides single-sided power to the contact network, at the end of which an unregulated power factor correction devices (PFC D) is turned on. When the traction load is reduced, the voltage in the traction network increases, as well as on the tires of the capacitor unit and the disconnected traction substation. A method of regulating the voltage at the supply traction substation with single-ended power supply of the traction AC network with unregulated PFC D included at the end of this section by changing the position of the on-load tap changer (OLTC) of the traction transformer is proposed. The required position of the OLTC is determined based on the calculation of the voltage at the end of the section. The calculation is based on the measured parameters at the beginning of the section. An algorithm for determining the position of the transformer OLTC, providing voltage normalization at PFC D for all oper-

ating modes, is proposed. The technical and economic effect is achieved by normalizing the voltage at PFCD and increasing the reliability of its operation.

**Keywords:** mathematical modeling, MATHCAD, on-load tap changer, power factor correction, reactive power compensation, single-ended AC power supply, traction network, transformer voltage regulation.

### References

- [1] L.A. German, «Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network», *Vestnik of the Railway Research Institute*, vol. 77, no. 5, pp. 288-294, May 2018.
- [2] L.A. German, A.S. Serebryakov and D.E. Dulepov, *Fil'trokompensiruyushchiye usta-novki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog. Monografiya (Filter-compensating installations in the traction power supply systems of railways)*. Knyaginino: NGIEU, 2017 (in Russian).
- [3] L.A. German, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko, A.V. Mizincev and D.V. Yakunin, «Adjustable installation of a cross capacitance compensation in traction network with bipolar thyristor key», *Electronics and electrical equipment of transport*, vol. 4, pp. 24-29, 2014 (in Russian).
- [4] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita (Relay protection)*, part 2. Moscow: GOU «UMTS», 2009 (in Russian).
- [5] R.I. Karaev, S.D. Volobrinский and I.N. Kovalev, *Elektricheskiye seti i energosistemy (Electric networks and power systems)*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [6] A.S. Serebryakov and V.V. Shumeyko, *MATHCAD i resheniye zadach elektrotehniki (MATHCAD and the solution of problems of electrical engineering)*. Moscow: Marshrut, 2005 (in Russian).

УДК 621.314

М.Ю. Петушков<sup>1</sup>, А.С. Сарваров<sup>1</sup>, О.В. Федоров<sup>2</sup>

## ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ НЕРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы перехода от нерегулируемого электропривода с короткозамкнутыми асинхронными двигателями к регулируемому электроприводу. Современный электропривод потребляет 45 % вырабатываемой электроэнергии и представлен асинхронными короткозамкнутыми двигателями мощностью до 40-50 кВт. В основной массе электроприводы в настоящее время являются нерегулируемыми, хотя около 80 % из них требуют регулирования. Из многообразия вариантов решения проблем электропривода выделены и проанализированы два основных направления: модернизация действующих электроприводов и создание новых, например, вентильно-реактивных приводов.

**Ключевые слова:** асинхронный короткозамкнутый двигатель, надежность, нерегулируемый асинхронный электропривод, трудоемкость, экономия электроэнергии, электроремонт.

### 1. Введение

Для металлургической отрасли свойственно применение большого числа двигателей. Парк электрических машин на предприятиях с полным циклом насчитывает десятки тысяч электродвигателей постоянного и переменного тока в диапазоне мощности от единиц до 5000 кВт и выше, применяемые в непрерывной цепи технологических операций:

- добыча и обогащение руды;
- подготовка шихты (агломерация);
- доменное и сталеплавильное производство;
- непрерывное литье заготовок для листового и сортового проката;
- прокатное производство;
- обработка поверхности (оцинкование, лужение, разделка и другие виды отделки);

- глубокая переработка металлопродукции (трубное, волочильное, метизное производство и др.)

## II. Количественная оценка парка электрических машин в ПАО «ММК»

Большое количество двигателей задействовано в системе водоснабжения и вентиляции, в кислородном производстве, а также в транспортировке и погрузочно-разгрузочных операциях. Общее состояние парка электрических машин в отрасли можно рассмотреть на примере современного металлургического предприятия. В табл. 1 даны количественные показатели по двигателям в различных группах мощности на примере крупнейшего в России Магнитогорского металлургического комбината (ПАО «ММК») [1]. Общее количество электрических машин по состоянию на март 2015 года составило 103 212 единиц, в том числе 17,3 % – постоянного тока и 82,6 % – переменного тока. Такого же порядка показатели характерны и для других металлургических комбинатов России.

Таблица 1.  
Количественная оценка парка электрических машин в ПАО «ММК»

№	Группы мощности, кВт	Распределение электродвигателей по группам мощности (количество)		
		Постоянного тока	Переменного тока	Постоянного + переменного тока
1	до 1,0	544	9162	9706
2	1,1-10,0	6028	48095	54123
3	10,1- 50,0	5812	19249	25061
4	50,1- 100,0	2178	4285	6463
5	100,1 - 250,0	1995	2686	4681
6	250,1 – 500,0	875	812	1687
7	500,1- 1000,0	212	553	765
8	1000,1 – 5000,0	201	394	595
9	свыше 5000	51	80	131
	Общее количество	17896	85316	103212

В период с конца 1990-х гг. и в первом десятилетии нашего века на комбинате были закрыты обжимные станы (слябинг и блюминги), происходила интенсивная замена устаревшего мартеновского производства стали на кислородно-конверторное и электропечное. В целом реконструкция и техническое перевооружение в этой отрасли реализуются в следующих направлениях:

- полная замена морально и физически устаревших производств;

- ввод в эксплуатацию принципиально новых технологических комплексов;
- модернизация отдельных агрегатов и узлов.

Данный процесс характеризуется изменениями в структуре электрооборудования рассматриваемого металлургического предприятия за период 2005-2017 гг. (табл. 2) [2].

Таблица 2.  
Динамика изменений в структуре парка электродвигателей и преобразователей

<b>Вид электро-оборудования</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2011</b>	<b>2013</b>	<b>2015</b>	<b>2017</b>
Общее количество электродвигателей	62279	59802	82063	82964	85305	891015	91229
в т.ч. постоянного тока	12130	10913	13802	13804	13953	14063	14137
в т.ч. переменного тока	50140	48896	64261	68180	71352	75052	77092
Общее количество преобразователей	3052	3543	3574	3750	4962	5023	5531
в т.ч. отечественных	2147	2095	2095	2051	1911	1783	1771
в т.ч. импортных	905	1448	1479	1649	3051	3240	3347
в т.ч. постоянного тока	2256	2272	2288	2301	2207	2166	2104
в т.ч. переменного тока	796	1271	1286	1449	2755	2857	3427

На горно-обогатительном производстве (ГОП) ПАО «ММК» прослеживается тенденция увеличения импортных преобразователей (табл. 2). Так, за более чем десятилетний период число отечественных преобразователей сократилось на 17,5 %, а импортных – увеличилось на 270 %. Общая численность преобразователей увеличилась на 82,4 %, что связано с проводимой политикой модернизацией и реструктуризации как технологических процессов, так и электрооборудования. По данным, приведенным в табл. 2, видно, что прирост двигателей переменного тока в период с 2005-2017 гг. составил 26 952 ед., а двигателей постоянного тока – 2006 ед. Практически все вновь вводимые технологические комплексы и агрегаты оснащены электроприводами переменного тока.

Большое количество двигателей задействовано в технологиях горно-обогатительного производства, где в эксплуатации находится широкий

круг различных механизмов. На примере ГОП ПАО «ММК» показана картина (рис. 1), характеризующая масштабность и многообразие электроприводов в этой сфере [3].

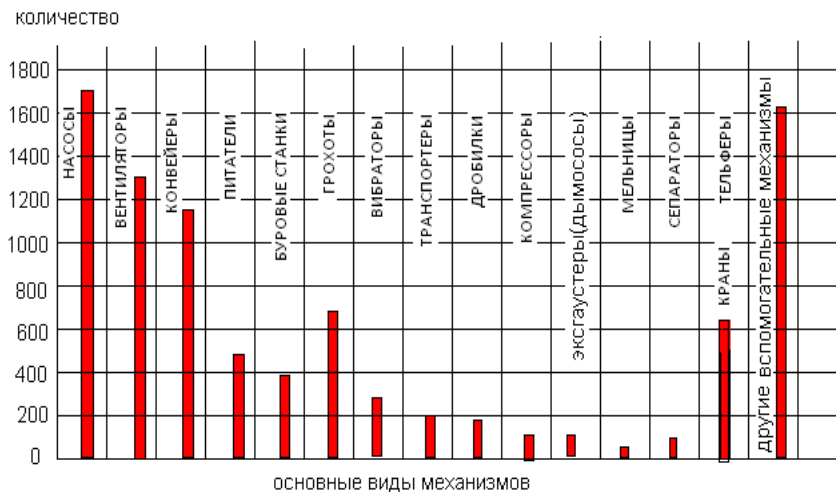


Рис. 1. Распределение асинхронных электроприводов по механизмам ГОП

Самыми массовыми в горнорудном производстве, как и в промышленности в целом, являются насосы и вентиляторы, включая их разновидности (эксгаустеры, дымососы). Доля механизмов подобного типа превышает 30 % от всего оборудования.

Специфичным оборудованием для ГОП ПАО «ММК» являются буровые станки, конвейеры и транспортеры, грохоты и вибраторы, мельницы и дробилки, электроприводы которых реализованы в своем большинстве на базе нерегулируемых короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД). В целом, большинство общепромышленных электроприводов (краны, тельферы, конвейеры и рольганги) выполнены на базе нерегулируемого асинхронного привода. Следует отметить, что в настоящее время в этой группе электроприводов достаточно интенсивно идет процесс модернизации. Парк электродвигателей переменного тока в ГОП ПАО «ММК» насчитывает свыше 10 тыс. единиц (рис. 2). Из диаграмм видно, что мощность до 15 кВт имеют свыше 70 % электродвигателей, задействованных в электроприводах конвейеров, питателей, транспортеров, грохотов, вибраторов и во многих вспомогательных механизмах технологического процесса предприятия. Более мощные двигатели применяются в подъемно-транспортных средствах, дробилках и барабанных смесителях, а также в

системе вентиляции, водоснабжения и гидротранспорта. Около 400 электродвигателей переменного тока в подразделениях ГОП являются высоковольтными, а в целом по комбинату их количество составляет около 1,5 тыс. единиц.

В металлургической промышленности наиболее мощными установками являются воздушные, кислородные и азотные турбокомпрессоры, питательные насосы и нагнетатели, которые приводятся во вращение высоковольтными синхронными двигателями. Пуск таких двигателей производится с применением пусковой обмотки типа «беличья клетка», т.е., так же, как и пуск асинхронного электродвигателя при прямом подключении к сети. Диапазон их мощностей находится в пределах от 1 до 20 МВт.

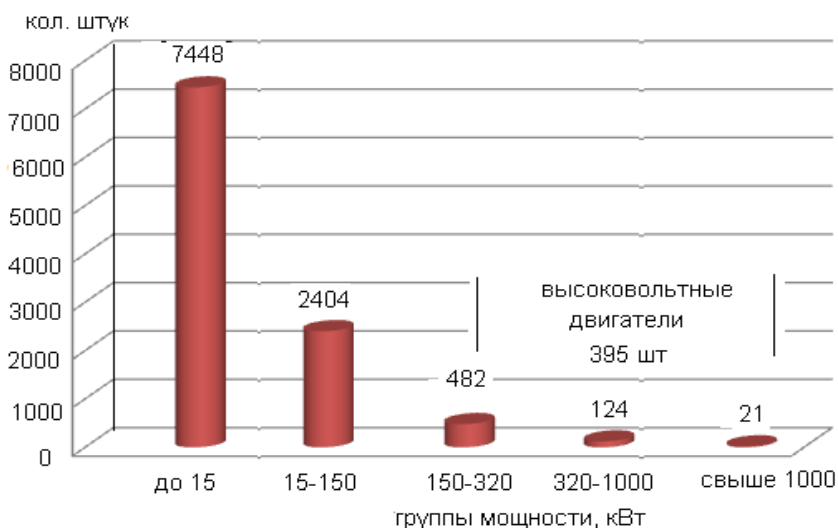


Рис. 2. Диаграммы распределения двигателей по группам мощности в горно-обогатительном производстве

Общеизвестно, что большинство электроприводов переменного тока практически во всех отраслях народного хозяйства России и ближнего зарубежья изначально проектировались как нерегулируемые, в своем большинстве такими они остаются и сегодня. Применение большого числа двигателей малой и средней мощности характерно также и для прокатного производства, где широко применяются различные исполнительные механизмы. В частности, привод механизмов непрерывного широкополосного стана горячей прокатки «2000» осуществляется примерно 2 тыс. двигателями суммарной мощностью 70 000 кВт [3].



Разнообразие и сложность технологических процессов при производстве проката, широкая номенклатура и высокая энерговооруженность прокатных станов, постоянно растущий уровень их автоматизации предъявляют к электроприводу прокатных станов весьма широкий спектр технико-экономических требований. Характерной особенностью главных электроприводов прокатных станов, введенных в прошлом столетии, является применение мощных электрических двигателей постоянного тока индивидуального исполнения. Эти двигатели являются уникальными, поскольку они проектировались для конкретного стана. Электроприводы на их основе были реализованы изначально по системе «генератор-двигатель», затем на отдельных станах применялись «системы управляемый ртутный выпрямитель-двигатель» (УРВ-Д).

Приведенные выше результаты обзора говорят о том, что асинхронный нерегулируемый электропривод все еще является широко распространенным.

### **III. Анализ проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода**

При переходе к регулированию в электроприводах неизбежно возникновение противоречий и ухудшение отдельных показателей, в частности, экономия электроэнергии, как правило, сопровождается ухудшением ее качества, снижаются показатели, характеризующие надежность электропривода. Возникают экологические проблемы, например, повышение шума при работе электропривода. Кроме того, необходима дополнительная подготовка обслуживающего персонала.

Развитие техники во всех областях народного хозяйства ведет к постоянному росту потребности в электроприводах на базе короткозамкнутых асинхронных двигателей, которые в настоящее время остаются самыми дешевыми и надежными. Необходимость создания регулировочных возможностей для таких двигателей обусловлена постоянным совершенствованием технологических процессов, созданием гибких технологий, требованиями экономичности эксплуатации. Высокая экономичность эксплуатации достигается за счет минимизации энергопотребления во всех режимах работы, при обеспечении максимального КПД и надежности работы.

Тенденцию перехода к регулируемому электроприводу можно проследить отдельно по отраслям народного хозяйства. Так, к электроприводу горных машин, применяемых в горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности, предъявляется ряд требований, наиболее важными из которых являются: высокие динамические показатели, экономичность преобразования энергии в различных режимах работы, высокие показатели надежности, торможение с позиционированием. В

этих отраслях промышленности происходит постоянное совершенствование электроприводов, в связи с этим существует большое разнообразие систем автоматизированного привода, различающихся как по типу применяемых двигателей, так и по составу силового оборудования.

Заметна тенденция применения электроприводов с частичным регулированием скорости асинхронных и синхронных двигателей, с импульсным регулированием систем асинхронного вентильного каскада и фазового управления. Наиболее перспективными в настоящее время являются системы с тиристорными преобразователями частоты для короткозамкнутых асинхронных двигателей (ТПЧ-АД). При этом необходимо отметить, что в горнодобывающей отрасли проблемы регулирования короткозамкнутых АД целесообразно решать только применением преобразователей частоты (ПЧ). Существует ряд механизмов, которые не требуют реализации всех показателей качества регулирования системы ПЧ-АД. Необходимо отметить, что хорошие регулировочные возможности частотного регулирования являются достаточно затратными, так как в силовой части присутствуют: мостовой выпрямитель, инвертор с узлами искусственной коммутации вентилей, фильтр. По этой причине нецелесообразно применять частотное регулирование, например, в электроприводах конвейеров, дробилок и т.д.

В условиях комплексной механизации добычи, извлечения переработки электроприводы механизмов тесно взаимосвязаны в технологической цепочке. Выход из строя любого звена в этой линии требует либо полного отключения всех звеньев со всеми последствиями, либо перевод их на резервный «малый ход», что позволяет:

- исключить возможность застывания смазки в механизмах;
- облегчить пуск установки на номинальный режим;
- исключить выход механизмов из непрерывного цикла работ;
- уменьшить износ оборудования.

Возможность осуществления режима резервирования в сочетании с возможностью многоступенчатого пуска с помощью тиристорного преобразователя может значительно сократить потери при эксплуатации исполнительных механизмов. Известно, что для многих приводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями в металлообрабатывающей отрасли, например, в металлорежущих станках, часто необходимо иметь, помимо основной рабочей скорости, одну или несколько пониженных скоростей для обработки малых перемещений и точной остановки неподвижных узлов. Требования подобного рода выполняются, как правило, за счет получения так называемой «ползучей» скорости, применения многоскоростных двигателей, а также за счет кратковременных подключений двигателя для отработки заданных малых перемещений, либо созданием «шагового»

режима работы двигателя. Важным направлением развития машиностроения является совершенствование автоматизированных систем электропривода с короткозамкнутым (к.з.) асинхронным двигателем, состоящее в увеличении доли регулируемых приводов, с требуемым диапазоном и качеством регулирования.

В настоящее время ставится задача создания интегрированных с технологическим оборудованием глубоко регулируемых асинхронных электроприводов высокого класса, обладающих не только высокой степенью регулируемости, но и повышенной надежностью и возможностью функционирования без частного профилактического обслуживания. Такая задача выдвигается в ходе совершенствования механизмов точного воспроизведения сложных движений, особенно работающих в условиях «безлюдных» технологий гибких автоматизированных производств и робототехнических комплексов, а также в связи с расширением их функциональных возможностей и повышением требований к качеству отработки назначенных траекторий. Вопросы надежности в данной сфере тесно связаны с простотой силовой части и системы управления. Применение серийно выпускаемых преобразователей частоты не всегда может удовлетворить требованиям «безлюдных» технологий.

Одной из основных проблем, связанных с повышением эффективности сельскохозяйственного производства, является проблема совершенствования сельскохозяйственных машин. Проблема заключается, прежде всего, в разработке и внедрении в сельскохозяйственные механизмы перспективных электромеханических систем на основе короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, как наиболее распространенных в данной отрасли: в сельском хозяйстве страны в настоящее время эксплуатируется около 15 млн электродвигателей. В этой отрасли мало используются ресурсы двигателя вследствие отсутствия регулирования, нарушений правил эксплуатации. В частности, выход из строя примерно 35 % парка электродвигателей происходит из-за аварийных режимов эксплуатации, что ежегодно наносит значительный материальный ущерб. Постоянная работа АД в сложных эксплуатационных и аварийных переходных режимах приводит к ускоренному старению изоляции, сокращению срока эксплуатации. Наиболее часто для механизмов сельскохозяйственного производства возникает режим стопорения, в результате заклинивания трущихся частей, попадания посторонних предметов, смерзания смазки и другие причины. Отсутствие регулирования является главной причиной выхода из строя не только двигателя, но и всего механизма. Пуск двигателей многих сельскохозяйственных механизмов часто становится проблематичным, не только вследствие нарушений условий эксплуатации, но и по причине того, что во многих случаях применяются автономные источники питания. Вопрос

ограничения пусковых токов и обеспечения достаточного пускового момента для короткозамкнутых АД до настоящего времени остается актуальным. Необходимо отметить, что повышение уровня электрификации быта сельского населения, а также появление потребности в бытовых электроустановках с использованием электропривода вызывает необходимость разработки регулируемого с короткозамкнутым асинхронным электродвигателем малой мощности (до 1 кВт). Для удовлетворения этой потребности в бытовых электроустановках (станок для заточки инструментов, мельница для измельчения зерновых культур и т.д.) используется серия трехфазных асинхронных двигателей. Система управления указанными двигателями в ряде случаев должна обеспечивать получение дополнительных скоростей вращения асинхронного двигателя. Кроме того, необходимо обеспечить получение мягкого пуска и удовлетворительного характера вращения ротора двигателя при питании его от однофазной сети. Особенно это важно для фермерских хозяйств.

Все применяемые системы управления и электроприводы сложной бытовой техники на сегодняшний день не обеспечивают плавного или многоступенчатого регулирования скорости в широком диапазоне. Не обеспечивают они и надежной эксплуатации, не требующей частого обслуживания, хороших экологических показателей, заключающихся в бесшумности работы привода, отсутствии загрязнений, а также возможности объединения каждого бытового прибора в компьютерную систему управления домашним хозяйством. Указанным требованиям в наибольшей степени может удовлетворять привод на основе короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с микропроцессорной системой управления.

Необходимо выделить отдельно группу общепроизводственных механизмов, которые присутствуют во всех отраслях производства и жизнеобеспечения. К ним относятся, в первую очередь, насосы, вентиляторы, компрессоры, подъемные тренажеры и т.п. Электропривод этих механизмов выполнен на базе короткозамкнутых АД. Необходимо отдельно оценить требования к уровню автоматизации этой группы электроприводов. Так, насосные станции большинства жилых и производственных зданий оборудованы нерегулируемым электроприводом с короткозамкнутыми асинхронными двигателями 5-15 кВт. Судя по опыту, трехкратная производительность таких станций зачастую избыточна, соответственно невысоки их энергетические показатели. Чтобы исправить это положение, необходимо ввести регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с целью изменения производительности насосных станций и улучшение экономичности их работы. Насосы и вентиляторы потребляют не менее 40 % электроэнергии, потребляемой массовым электроприводом, и, по сути, заключают в себе резервы энергосбережения, поскольку в настоящее

время управление производительностью массовых установок, снабженных нерегулируемым асинхронным электроприводом с к.з. двигателем, осуществлялся, как правило, крайне неэффективно.

Ввиду резкого увеличения цен на энергоресурсы, в настоящее время наиболее отчетливо просматривается радикальное средство энергосбережения: регулирование электропривода насосов и вентиляторов. По опыту разработки и эксплуатации насосных станций мощностью 10-30 кВт с частотно управляемым электроприводом, накопленному в МЭИ, экономия энергии составляет 40-50 %, воды – 15-20 %, тепла – до 20 %.

Доказано, что в насосных станциях водопроводных сетей, имеющих более четырех агрегатов, основу которых составляет асинхронный электропривод, не менее двух агрегатов должны быть построены на основе регулируемого электропривода. Наличие регулируемых электроприводов позволяет образовать локальные системы автоматического поддержания давления в водопроводных сетях, тем самым, делая возможной реализацию экономичного потребления электроэнергии вне зависимости от режима водопотребления. Следует отметить, что при современной стоимости электрооборудования замена, к примеру, электропривода с к.з. асинхронным электродвигателем питательного насоса типа ПЭ 580-185-3, установленного в котельных агрегатах большой мощности, на регулируемый окупится через 7-9 лет. Однако, при наблюдающемся росте стоимости энергоносителей и снижении стоимости элементов силовой части электроники, срок окупаемости в ближайшие годы должен уменьшиться. Это, несомненно, приведет к еще большей экономической целесообразности применения регулируемого электропривода в насосных агрегатах.

В приводах вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения, эксплуатируемых в угольной, химической, газовой, нефтеперерабатывающей и в других отраслях промышленности со взрывоопасными условиями производства, используются асинхронные электродвигатели типа ВАСО, технико-экономические показатели которых при современном энергетическом кризисе свидетельствуют о недостаточной экономичности этих двигателей. Для улучшения энергетических параметров вентиляторов является целесообразным внедрение безредукторного привода на основе к.з. асинхронного двигателя, работающего на пониженных скоростях. Необходимость введения регулирования привода вентиляторных установок отчетливо видно на примере охлаждения тяговых электродвигателей, выпрямителей, трансформаторного оборудования на электровозах переменного тока. В настоящее время для выполнения этой функции используется нерегулируемый асинхронный электропривод, расходы на работу которого составляют около 15 % от общей потребляемой локомотивом энергии. Поскольку нагрузка и, следовательно, нагрев меняются от нагрузки на локо-

мотив, применение регулируемого привода вентилятора является весьма перспективным. В электроприводах подъемно-транспортных машин широко применяются асинхронные двигатели (механизмы башенных кранов, транспортеров, тельферов, лифтов и т.д.) Если еще 10-15 лет назад до 90 % грузов при переработке не требовало регулирования скорости, то в настоящее время около четверти всех грузов, перерабатываемых в машиностроении, а применительно к строительству – около 80 % всех грузов, требуют глубокого регулирования скорости электропривода, обеспечения удобства управления, плавности движения.

Из приведенных примеров однозначно следует устойчивая тенденция, характерная для сегодняшнего состояния народного хозяйства страны: электропривод с короткозамкнутым асинхронным электродвигателем, особенно в своем массовом применении, нуждается в различной степени регулировочных свойствах. Это, прежде всего, связано с обеспечением энергосберегающих режимов работы механизмов при изменении технологических нагрузок на них, с созданием нескольких рабочих скоростей, обеспечением условий пуска и стопорения, а также с согласованием работы комплексов механизмов. По требованиям и уровню автоматизации массовые асинхронные электроприводы можно условно разделить на четыре группы.

Первая группа – электроприводы, нуждающиеся в постоянном регулирующем воздействии. Это, прежде всего, электроприводы вентиляторов, насосов, дозаторов и других механизмов, производительностью которых необходимо управлять в функции поддержания заданных параметров, или реализации определенных законов их изменения. Как правило, такие электроприводы требуют глубокого регулирования частоты вращения с заданной точностью и потому требуют реализации в замкнутых системах автоматического регулирования. Наилучшим вариантом для таких электроприводов является применение систем ПЧ-АД.

Вторая группа – электроприводы механизмов, требующих циклического управляющего воздействия, связанного с заправкой, позиционированием рабочих органов, перемещением запорной арматуры и другие вспомогательные операции. Управляющие воздействия при этом имеют дискретный характер. Смысл управления заключается в переходе от основной скорости на пониженные скорости вращения и наоборот. Для таких электроприводов достаточно применить более простые силовые структуры, по сравнению с ПЧ-АД.

Третья группа – электроприводы, которые в технологической цепи производственных процессов могут по разным причинам работать достаточно длительно с малой нагрузкой, или даже на холостом ходу. Для таких электроприводов стоит задача минимизации энергопотребления с перево-

дом на пониженные частоты вращения. Для реализации таких режимов, так же, как и в предыдущем случае, целесообразно применять самые простые силовые структуры.

Четвертая группа – электроприводы, для которых главной проблемой становится пуск АД в условиях ограниченной мощности источника питания. Для таких электроприводов стоит задача максимального ограничения пускового тока при формировании требуемого пускового момента. В практике асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором наилучшим образом пуск реализуется для систем ПЧ-АД, но сложность силовой структуры преобразователей частоты ограничивает их применение в качестве пусковых устройств.

Традиционные способы регулирования частоты вращения АД общеизвестны [4]. Это, прежде всего, параметрические способы регулирования, такие, как реостатное регулирование изменением реактивных сопротивлений, изменением числа пар полюсов, регулирование импульсным изменением параметров. Наилучшие регулировочные свойства, как уже отмечалось ранее, дает частотное регулирование и применение тиристорных преобразователей напряжения (ТПН). Для маломощных асинхронных двигателей применяется регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения. Отмеченные способы регулирования относятся к короткозамкнутым двигателям. Для АД с фазным ротором регулировочные возможности значительно расширяются. Здесь дополнительно следует отметить систему асинхронно-вентильного каскада (АВК), регулирование при двойном питании и др. возможности. Реостатное регулирование, применительно к короткозамкнутому АД, заключается в изменении активного сопротивления в цепи статора. Оно характеризуется низким КПД, снижением критического момента и неустойчивой работой. Регулировочные возможности при этом плохие, поэтому реостатное регулирование не имеет перспектив.

Регулирование с помощью реактивных сопротивлений сопряжено со снижением коэффициента мощности, и по своим характеристикам аналогично реостатному. Преимущество заключается в возможности применения плавно регулируемых индуктивных сопротивлений – реакторов с регулируемым подмагничиванием. Обычно реакторы применяются в цепи статора для улучшения условий пуска высоковольтных двигателей. Других перспектив по сравнению с реостатным регулированием данный способ не имеет.

Регулирование изменением числа пар полюсов обладает такими достоинствами, как постоянство мощности, неизменность жесткости механических характеристик, переход на пониженную скорость связан с работой в режиме рекуперативного торможения, высокая экономичность и

простота реализации. Массовое применение этого способа невозможно, так как необходимы специальные многоскоростные двигатели. Количество ступеней скорости таких двигателей ограничивается главным образом двумя, реже тремя и более ступенями. В настоящее время многоскоростные двигатели применяются в электроприводах станков, конвейеров, элеваторов, толкателей, питателей и других механизмах.

#### **IV. Заключение**

Вопросам теории и опыта применения тиристорных преобразователей напряжения для короткозамкнутых АД уделялось большое внимание в течение последних двух-трех десятилетий [1, 3, 5, 6]. Регулирование скорости импульсным способом заключается в периодическом кратковременном включении и отключении двигателя с помощью тиристорных переключателей. Этот способ получил свое развитие с широким применением ТПН.

Особенно успешно в этом направлении велись работы в Московском энергетическом институте, Уральском государственном техническом университете, Одесском политехническом институте, ЦНИИ «Электроприбор». Оценивая перспективы дальнейшего развития этого направления, следует проанализировать его преимущества и недостатки. Главное достоинство – простота реализации силовой части ТПН, выполняющий не только функции простого бесконтактного пускателя или коммутатора, но и простого маловентильного управляемого преобразователя напряжения и в некоторых случаях – частоты. На кафедре АЭП МЭИ проводится систематический обзор направлений разработок по повышению энергетической эффективности асинхронных электроприводов. В таком обзоре выделена группа публикаций, в которых с целью повышения энергетической эффективности применены тиристорные преобразователи напряжения (ТПН без регулирования скорости), где экономия электроэнергии определяется автоматическим поддержанием оптимального напряжения, соответствующего данной нагрузке. Однако, следует принять во внимание, что в этой системе наблюдаются неустойчивые режимы, характеризующиеся значительными автоколебаниями момента и скорости. Наиболее часто такой режим возникает при отсутствии нагрузки, например, в режиме технологического холостого хода.

Учет разнообразия электроприводов и преобразователей в пределах конкретного предприятия позволяет целенаправленно его уменьшать, что упрощает электроремонтную базу организации и сокращает трудоемкость электроремонтных работ (внутрипроизводственные резервы).

© Петушков М.Ю., 2019

© Сарваров А.С., 2019

© Федоров О.В., 2019



**Библиографический список**

- [1] Кочетков В.Д., Козырев С.К. Состояние и тенденции развития автоматизированного электропривода в XXI веке // Труды IV Межд. (XV Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004), Сентябрь 14-17, 2004, Магнитогорск, Россия. Часть 1. С. 5-8.
- [2] Сарваров А.С., Анисимов Д.М., Усатый Д.Ю., Петушков М.Ю., Вечеркин М.В. Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 3 (35). С. 8-11.
- [3] Анисимов Д.М., Славгородский В.Б., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Методологические аспекты модернизации металлургических электроприводов // Труды межд. конф. «Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении: Международная конференция», Октябрь 22-24, 2008, Магнитогорск, Россия. С. 100-112.
- [4] Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.
- [5] Шевырев Ю.В., Федоров О.В., Сарваров А.С. Современный технологический уклад и его ресурсное обеспечение // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 3. С. 82-90.
- [6] Татарских Б.Я., Федоров О.В. Организационно-экономические проблемы повышения инновационного потенциала машиностроительного комплекса России // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2016. № 3 (137). С. 16-22.

**M.Y. Petushkov<sup>1</sup>, A.S. Sarvarov<sup>1</sup>, O.V. Fedorov<sup>2</sup>**

**WAYS TO SOLVE PROBLEMS IN FIELD  
OF UNREGULATED ASYNCHRONOUS ELECTRIC  
DRIVE IN METALLURGICAL INDUSTRY**

<sup>1</sup> Magnitogorsk State Technical University n.a. G.I. Nosov,  
Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The article considers aspects of the transition from an unregulated electric drive with squirrel-cage induction motors to an adjustable one. In recent years, special attention has been paid to the problems of modern electric drive, which consumes 45% of the generated electricity, and is represented by asynchronous squirrel-cage motors with a capacity of up to 40-50 kW. The bulk of electric drives are currently unregulated, although about 80% of them require regulation. From the variety of options for solving the problems of the electric drive, two main areas should be distin-

guished: the modernization of existing electric drives and the creation of new, for example, valve reluctance drives.

**Keywords:** asynchronous squirrel cage motor, electrical repair, energy saving, labor intensity, reliability, unregulated asynchronous electric drive.

### References

- [1] V.D. Kochetkov and S.K. Kozyrev, «Sostoyaniye i tendentsii razvitiya avtomatizirovannogo elektro-privoda v XXI veke (Status and development trends of an automated electric drive in the 21st century)», in proc. *IV Int. (XV All-Russian) conf. «Avtomatizirovanny elektroprivod v XXI veke: puti razvitiya» (Automated electric drive in the 21st Century: Development paths)*, Sept. 14-17, 2004, Magnitogorsk, Russia, part 1, pp. 5-8 (in Russian).
- [2] A.S. Sarvarov, D.M. Anisimov, D.J. Usatyi, M.J. Petushkov and M.V. Vecherkin, «State analysis of electric drives of ore-dressing units of OJSC «MMK» and some ways of their enhancement», *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, no. 3, pp. 8-11, 2011.
- [3] D.M. Anisimov, V.B. Slavgorodskiy, A.S. Sarvarov and M.Y. Petushkov, «Metodologicheskiye aspekty modernizatsii metallurgicheskikh elektroprivodov (Methodological aspects of the modernization of metallurgical electric drives)», in proc. *Elektroenergetika i avtomatizatsiya v metallurgii i mashinostroyenii (Power and automation in metallurgy and mechanical engineering)*, Oct. 22-24, 2008, Magnitogorsk, Russia, pp. 100-112 (in Russian).
- [4] V.P. Bychkov, *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva (Electric drive and automation of metallurgical production.)*. Moscow: Vysshaya shkola, 1977 (in Russian).
- [5] Yu.V. Shevyrev, O.V. Fedorov and A.S. Sarvarov, «Technology state-of-the-art and supply of resources», *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, vol. 3, pp. 82-90, 2018.
- [6] B.Ya. Tatarskikh and O.V. Fedorov, «Organizational and economic problems of innovative capacity machine-building complex improvement in Russia», *Vestnik of Samara State University of Economics*, vol. 3, no. 137, pp. 16-22, 2016.

УДК 621.318.435, 621.31.002.237

**В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов**

## **РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЛЭП**

Воронежский государственный технический университет

Рассмотрены пути реализации дополнительных функциональных возможностей статического регулятора напряжения на основе вольтодобавочного трансформатора, предназначенного для высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). Это решение позволяет оптимизировать пропускную способность ЛЭП, потери электрической энергии, ее качество, затраты на эксплуатацию и модернизацию силового оборудования. Приведены основные технические и энергетические параметры тиристорно-трансформаторного регулятора напряжения (ТТРН) с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора. Для их определения использовалась графическая среда имитационного моделирования MATLAB Simulink, модернизированные программы LabVIEW, LTSpice и блоки «powergui», «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1-40». Дополнительная оптимизация режимов работы ЛЭП при компенсации ее зарядной мощности реализуется с помощью разработанного алгоритма системы управления ТТРН. Приведены результаты анализа регулирования потребляемой силовыми трансформаторами ТТРН реактивной мощности, с учетом кривой намагничивания и ограничений по выбору оборудования и режимов его работы.

**Ключевые слова:** FACTS, компенсация реактивной мощности, линия электропередач, тиристорный регулятор напряжения.

### **I. Введение**

Одними из приоритетных направлений развития мировой электроэнергетики можно по праву назвать создание высоко интегрированных интеллектуальных электрических сетей с использованием силовой электроники и устройств на их основе, например, многофункциональные статические устройства регулирования напряжения и реактивной мощности.

Такой подход наиболее приоритетен для распределительных сетей (35-220 кВ), так как именно в этом сегменте наблюдается наиболее высокий уровень потерь энергии. Данное обстоятельство обусловлено износом сетевого оборудования, недостаточными возможностями по оптимизации режимов работы, недостаточным учетом потребления электрической энергии.

В настоящее время возрастает актуальность вопросов перехода от существующих электроэнергетических систем (ЭЭС) к сетям на базе концепции Smart Grid и технологии FACTS. В результате появляется возможность многопараметрической оптимизации режимов работы ЭЭС (по таким параметрам, как пропускная способность ЛЭП, потери электрической энергии, качество электрической энергии, затраты на эксплуатацию и модернизацию и т.д.) [1-3].

Основная концепция данного направления видится в реализации ЛЭП современных конструкций, статических компенсаторов реактивной мощности и трансформаторов (автотрансформаторов) со статическими регуляторами напряжения (РПН) [4, 5].

### **II. Цели и задачи исследования**

Цель настоящего исследования – реализация оптимального управления режимами работы высоковольтных ЛЭП с помощью регулирования не только напряжения, но и реактивной мощности. В данном контексте решаются задачи максимального использования технических возможностей статических устройств регулирования указанных параметров ЭЭС, а именно: тиристорных регуляторов для вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) ЛЭП. Основным средством компенсации реактивной мощности (РМ) являются в настоящее время батареи силовых конденсаторов (БСК) и шунтирующие реакторы (ШР). Они используются для оптимизации режимов работы ЛЭП и ограничения токов короткого замыкания. К их недостаткам следует отнести: отсутствие плавного регулирования РМ, низкое быстродействие, вероятность возникновения резонансных и автоколебательных процессов при определенных сочетаниях параметров элементов ЛЭП.

Более высокие технические характеристики имеет статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ). Он способен решать такие задачи как повышение пропускной способности ЛЭП и обеспечение устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях. Вместе с тем, наряду с несомненными достоинствами, ему свойственна высокая стоимость и относительно низкая надежность, связанная со структурной сложностью.

Регулирование напряжения реализуется весьма ограниченно, с помощью регулирования под нагрузкой (РПН) трансформаторов (автотрансформаторов) с механическим приводом. В высоковольтных сетях применяются схемы с ВДТ, включенными со стороны нуля силового трансформатора (автотрансформатора). Они позволяют получить продольное или поперечное регулирование напряжения, что позволяет изменять перетоки реактивных и активных мощностей по ЛЭП. К недостаткам данных устройств следует отнести отсутствие плавного регулирования напряжения, низкое быстродействие и недостаточную надежность.

### III. Решение задачи

Решение поставленной задачи видится в применении вместо механических устройств РПН тиристорных регуляторов напряжения, обладающих хорошим соотношением показателей «цена-качество» и широкими функциональными возможностями. Регулятор такого типа (рис. 1) содержит следующие элементы: основной трансформатор 1 и вольтодобавочный трансформатор 2, тиристорные ключи 3 и 4, блок задержки 5, и СУ. Он может быть реализован как полноценное устройство технологической платформы *FACTS* с минимальными затратами на регулировочное электрооборудование (как, например, уже на находящихся в эксплуатации агрегатах типа ВРТ, ДНУ, ЛТДН и на трансформаторах с анцапфами) класса напряжения от 35 кВ до 1150 кВ включительно [6-9].

### IV. Теоретическая часть

Описанные тиристорно-трансформаторные регуляторы напряжения (ТТРН) работают на принципе фазового управления, что приводит к искажению формы кривой выходного напряжения и тока, что является главным недостатком таких регуляторов. Учитывая это, для обеспечения допустимых по ГОСТ Р32144-2013 пределов нелинейных искажений целесообразно выбрать принцип двух зонного регулирования (режимах добавления и вычитания определенной величины напряжения) [10].

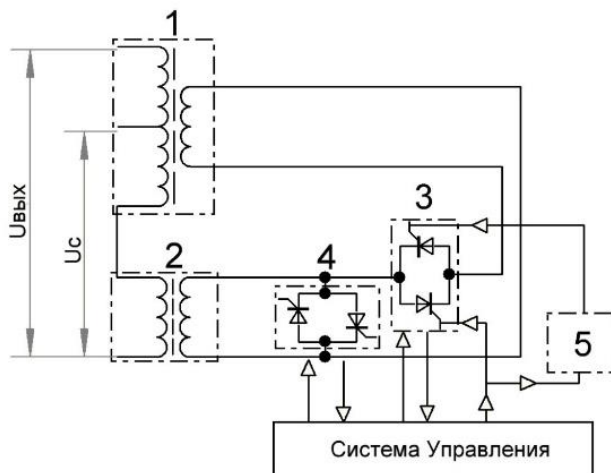


Рис. 1. Принципиальная однофазная электрическая схема силовой части ТТРН

Для получения количественных показателей технических и энергетических параметров ТТРН и их возможностей требуется определение

спектра высших гармоник с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора. При насыщении магнитопровода появляются дополнительные потери: возрастает первичный ток трансформатора и несинусоидальность. Эти задачи решались с помощью компьютерного моделирования ТТРН. Была использована графическая среда имитационного моделирования MATLAB Simulink, модернизированные программы LabVIEW, LTSpice. Модель, построенная в данной среде, представлена на рис. 2.

Используемые блоки «powergui», «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1-40» позволяют создать файл с данными петли гистерезиса и вычислить высшие гармоники.

Расчеты проводились при десятипроцентном диапазоне регулирования, вариации угла нагрузки  $\varphi = 0 \div 60^\circ$  и изменении выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  (за счет изменения угла отпирания тиристоров  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$ ).

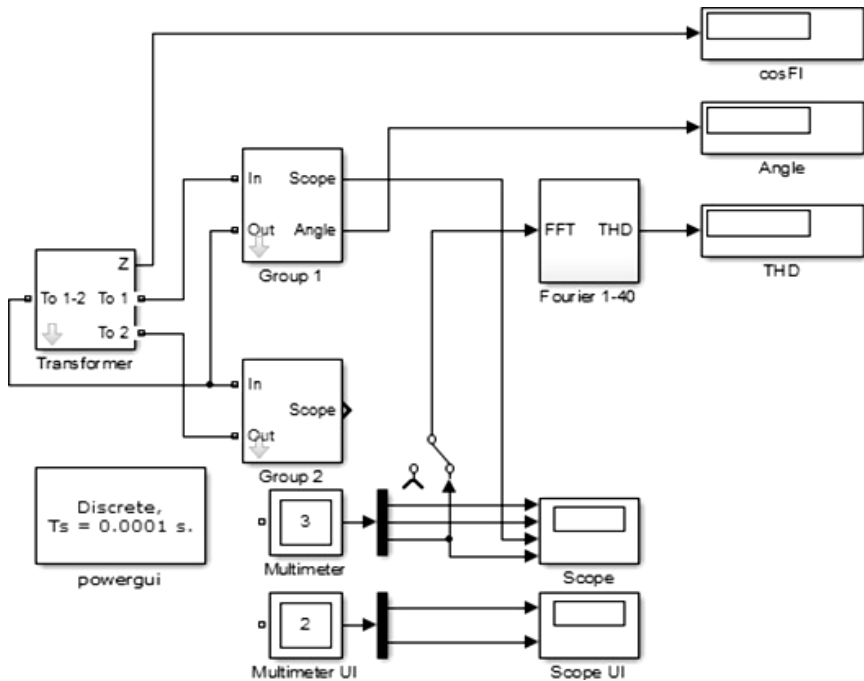


Рис. 2. Математическая модель одной фазы ТТРН

Было получено семейство трехмерных графиков зависимости КНИ фазного (рис. 3) и линейного (рис. 4) выходного напряжения от угла нагрузки и угла отпирания тиристоров.

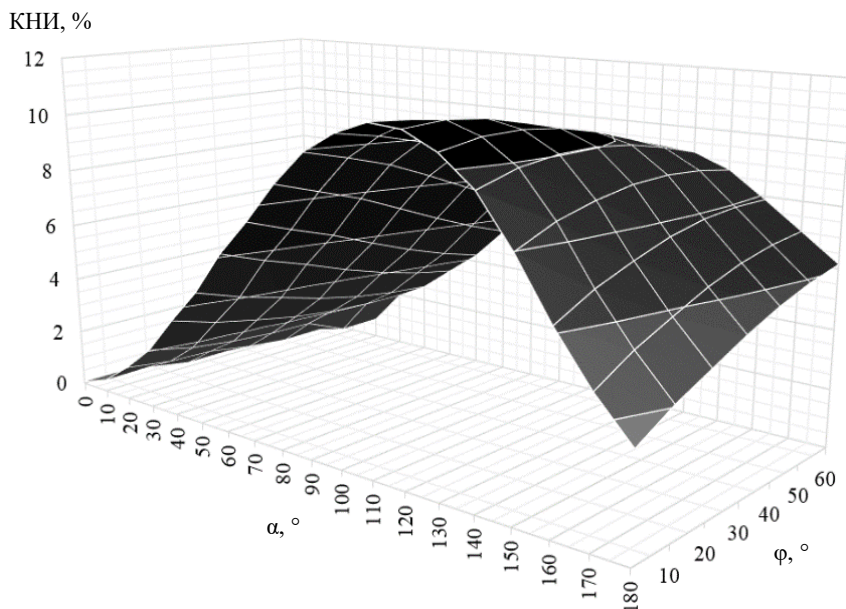


Рис. 3. Трехмерный график зависимости КНИ фазного выходного напряжения ТТРН от  $\alpha$ ,  $\varphi$ , с учетом кривой намагничивания силового трансформатора

Анализовалась и величина дополнительных потерь от высших гармоник в ВДТ и АТ. Используя известные соотношения и созданные в среде MATLAB Simulink специальные блоки вычисления, были определены зависимости мощности искажения  $T$ , дополнительных потерь высших гармоник в стали и меди ВДТ, АТ от угла отпирания тиристоров группы 3 (рис. 1) [11-13].

Расчеты показывают, что при десятипроцентном диапазоне регулирования дополнительные потери от высших гармоник не превышают 5 % от величины мощности искажения  $T$ , она же может достигать 27 % от номинальной мощности ВДТ ( $S = 100$  МВА). Данный фактор необходимо учитывать при выборе силового трансформаторного оборудования по критерию допустимого нагрева и установленной мощности.

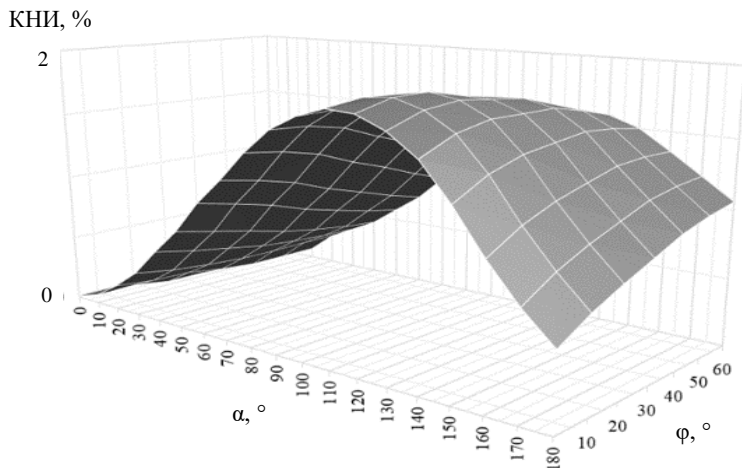


Рис. 4. Трехмерный график зависимости КНИ линейного выходного напряжения ТТРН от  $\alpha$ ,  $\varphi$ , с учетом кривой намагничивания силового трансформатора

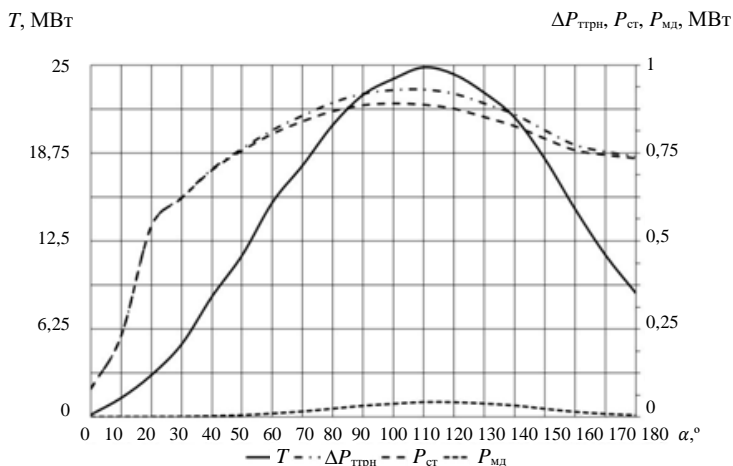


Рис. 5. Зависимость дополнительных потерь от высших гармоник в ВДТ (при  $\varphi = 30^\circ$ )

Регулирование потребления реактивной мощности основным и вольтодобавочным трансформаторами на схмотехническом уровне достигается введением в цепь управления одним из тиристоров тиристорного



ключа 4, регулируемого элемента задержки. Он позволяет получить постоянную составляющую в гармоническом составе напряжения на трансформаторе 2, что и изменяет потребляемую реактивную мощность.

Для предлагаемого выше аппаратного решения был проведен анализ изменения потребляемой реактивной мощности с учетом кривой намагничивания силового автотрансформатора (АТ) (заводские данные, для АОДЦТ-667000/1150/500/20). В качестве математической основы программы расчета был использован метод Фурье, для определения амплитуды и фазовых углов гармоник, коэффициента нелинейных искажений и действующего значения тока намагничивания  $I_{\mu}(t)$ . При этом считалось, что основной магнитный поток АТ не искажается его магнитной системой  $\Phi(t) \equiv U_{\text{вых}}(t) = \Phi \cdot \sin(\omega t)$ , а активной составляющей можно пренебречь (она много меньше его реактивной составляющей  $I_{\mu a} \ll I_{\mu R}$ ).

Для нахождения потребляемой АТ (аналогично и ВДТ) активной, реактивной мощности и постоянной составляющей использовался программный способ на базе библиотеки SimPowerSystems в MATLAB Simulink. В процессе расчетов варьировалось нагрузка АТ ( $0,5 \cdot P_{н}$ ;  $0,75 \cdot P_{н}$ ;  $P_{н}$ ), степень его подмагничивания. При разности углов включения  $\Delta\alpha_p = \alpha_2 - \alpha_1 = 40^\circ - 30^\circ = 10^\circ$ , имеем постоянную составляющую, равную 0,52 % от номинального тока ВДТ. При  $\Delta\alpha_p = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$  – постоянная составляющая увеличивается до 5,88 %. Расчеты проводились при увеличении постоянной составляющей вплоть до значений 30 % от номинального тока ВДТ. Результаты расчетов представлены на рис. 6.

#### **VI. Практическая значимость**

Основные практические результаты состоят в части реализации проектными организациями комплекса аппаратных решений по использованию ТТРН при перспективном и конкретном проектировании широкого класса объектов ЭЭС, вплоть до отдельных индивидуальных электротехнических комплексов.

Реализация предложенных выше аппаратных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне ЭЭС и сетевых энергоснабжающих компаний.

#### **VII. Заключение**

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- для высоковольтных ЛЭП возможно использование тиристорных регуляторов напряжения ВДТ в качестве устройств РПН технологической платформы FACTS;

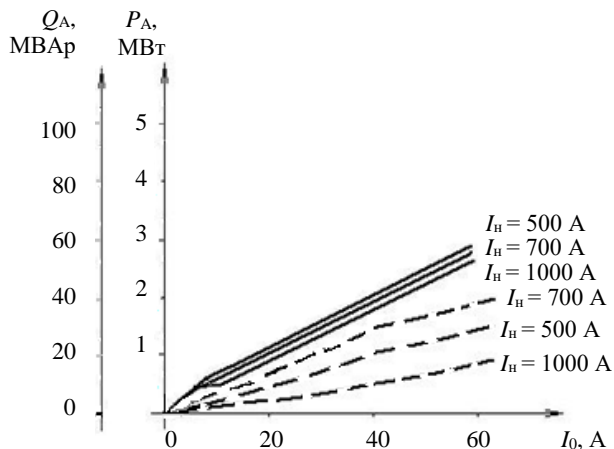


Рис. 6. Зависимость потребляемой АТ активной (сплошная линия) и реактивной (пунктирная линия) мощности от степени его подмагничивания

- для точного анализа возможностей применения этих необходим учет генерируемых ими высших гармоник и дополнительных потерь;
- в основных режимах работы ЛЭП, КНИ не превышает  $8,5 \div 10$  %, а для линейного напряжения данный параметр не превышает 2 %;
- для обеспечения допустимых по ГОСТ Р32144-2013 пределов нелинейных искажений, целесообразно выбрать принцип двух зонного (не более 10 %) регулирования;
- при 10 % диапазоне регулирования дополнительные потери от высших гармоник не превышают 5 % от величины мощности искажения  $T$ , она же может достигать 27 % от номинальной мощности ВДТ;
- благодаря специальному алгоритму работы силовых ключей тиристорного регулятора, возможна дополнительная оптимизация режимов работы ЛЭП по фактору компенсации РМ емкостного характера;
- при реализации такого алгоритма, силовой автотрансформатор способен увеличить потребление реактивной мощности с  $0,3 \div 0,5$  % до  $20 \div 30$  % от СН. При этом потери активной мощности в АТ дополнительно увеличивается до 1,5 % от СН.

© Крысанов В.Н., 2019

© Бурковский В.Л., 2019

© Данилов А.Д., 2019

**Библиографический список**

- [1] Гусев С.И., Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Развитие устройств FACTS // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2013. № 1. С. 7-20.
- [2] Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф. Опыт внедрение технологии FACTS за рубежом (часть 1) // Энергохозяйство за рубежом. 2007. № 2. С. 27-48.
- [3] Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф. Опыт внедрение технологии FACTS за рубежом (часть 2) // Энергохозяйство за рубежом. 2007. № 3. С. 46-64.
- [4] Степанов В.Н. Использование силовых устройств с управляемыми полупроводниковыми преобразователями на объектах электроэнергетики // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2013. № 2. С. 34-40.
- [5] Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- [6] Крысанов В.Н. О возможности применения тиристорного регулятора напряжения в электрических сетях класса 6-1150 кВ // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 10. С. 9-12.
- [7] Расулов М.М., Рубин Я.С., Крысанов В.Н., Быков В.Е., Мамедов А.Ф. Регулятор переменного напряжения, А.С. 1267384 СССР, заявл. 27.06.85; опубл. 30.10.86. – Бюл. № 40.
- [8] Лысков Ю.И., Крысанов В.Н., Быков В.Е., Байрашная О.Б. Регулируемый преобразователь переменного напряжения в переменное, А.С. 1494172 СССР, заявл. 30.11.87; опубл. 15.07.89. – Бюл. № 26.
- [9] Arrillage J., Woods G., Duke R.M. Thyristor-controlled in-phase boosting for h.v.d.c. converters // IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution). 1980. № 127 (4). Pp. 221-227.
- [10] Крысанов В.Н., Гамбург К.С. Выбор силовой части высоковольтных тиристорных регуляторов напряжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 3. С. 35-39.
- [11] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Исследование влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронного двигателя // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 2. С. 6-11.
- [12] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Учет нелинейности магнитопровода силового трансформатора в статических регуляторах напряжения для энергопотребителей // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 35-38.
- [13] Рекус Г.Г., Чирков М.Г. О воздействии гармоник на нагрев асинхронных двигателей // Известия вузов СССР. Энергетика. 1965. № 3. С. 34-38.

V.N. Krysanov, V.L. Burkovsky, A.D. Danilov

## EXPANSION OF FUNCTIONAL CAPABILITIES OF STATIC POWER LINE VOLTAGE CONTROL DEVICES

Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russia

**Abstract.** The article discusses the ways of implementing additional functionality of a static voltage regulator for high-voltage power lines, based on a booster transformer. This solution allows one to optimize the transmission capacity of power lines, the losses of electric energy, power quality, operating costs and cost of upgrading power equipment. Thyristor-transformer voltage regulator (TTVR) main technical specifications and energy parameters, considering the power transformer magnetic core effect were considered. MATLAB Simulink graphical simulation environment, upgraded LabVIEW, LTSpice programs and «powergui» blocks, «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1–40» blocks were applied to determine them. Additional optimization of power lines operation modes is implemented using the developed algorithm of the TTVR control system when compensating the charging power of power lines. The analysis of regulation of reactive power consumed by TTVR power transformers was carried out, taking into account the magnetization curve, and restrictions on the choice of equipment and modes of operation.

**Keywords:** FACTS, power transmission lines, reactive power compensation, thyristor voltage regulator.

### References

- [1] S.I. Gusev, Yu.G. Shakaryan and N.L. Novikov, «Razvitie ustrojstv FACTS (Development of FACTS devices)», *Elektroenergetika: segodnya i zavtra (Electrical energy industry today and tomorrow)*, vol. 1, pp. 7-20, 2013 (in Russian).
- [2] M.S. Misrikhanov and V.F. Sitnikov, «Opyt vnedrenie tekhnologii FACTS za rubezhom (chast' 1) (Experience of FACTS technology implementation abroad (part 1)) », *Energohozyajstvo za rubezhom (Power utilities abroad)*, vol. 2, pp. 27-48, 2007 (in Russian).
- [3] M.S. Misrikhanov and V.F. Sitnikov, «Opyt vnedrenie tekhnologii FACTS za rubezhom (chast' 1) (Experience of FACTS technology implementation abroad (part 1))», *Energohozyajstvo za rubezhom (Power utilities abroad)*, vol. 3, pp. 46-64, 2007 (in Russian).
- [4] V.N. Stepanov, «Ispol'zovanie silovyh ustrojstv s upravlyaemymi poluprovodnikovymi pre-obrazovatelyami na ob"ektah elektroenergetiki (Application of power facilities with controlled semi-conductor converters at power engineering facilities)», *Elektroenergetika: segodnya i zavtra (Electrical energy industry today and tomorrow)*, vol. 2, pp. 34-40, 2013 (in Russian).

- 
- [5] N.G. Hingorani and L. Gyugui, *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- [6] V.N. Krysanov, «O vozmozhnosti primeneniya tiristorного регулятора napryazheniya v elektricheskih setyah klassa 6-1150 kV (About possible application of thyristor voltage controller in electric grids of 6-1150 kV)», *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 10, pp. 9-12, 2008 (in Russian).
- [7] M.M. Rasulov, Ya.S. Rubin, V.N. Krysanov, V.E. Bykov and O.B. Bayrashnaya, «Regulyator peremennogo napryazheniya (AC controller)», USSR Patent 1267384, Oct. 30, 1986 (in Russian).
- [8] Y.I. Lyskov, V.N. Krysanov, V.E. Bykov and O.B. Bayrashnaya, «(Reguliruemyy preobrazovatel' peremennogo napryazheniya v peremennoe) Adjustable converter from AC to AC», USSR Patent 1494172, July 15, 1989 (in Russian).
- [9] J. Arrillage, G. Woods and R.M. Duke, «Thyristor-controlled in-phase boosting for h.v.d.c. converters», *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 127, no. 4, pp. 221-227, July 1980.
- [10] V.N. Krysanov and K.S. Hamburg, «Optimization of high-power thyristor voltage regulators», *Energy Safety and Energy Economy*, vol. 3, pp. 35-39, 2011.
- [11] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, «Issledovanie vliyaniya nesinusoidal'nosti pitayushchego napryazheniya na energeticheskie harakteristiki asinhronnogo dvigatelya (Investigation of effect of supply voltage unsinusoidality on power characteristics of asynchronous motor)», *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 2, pp. 6-12, 2014 (in Russian).
- [12] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, «Uchet nelinejnosti magnitoprovoda silovogo transformatora v staticheskikh regulyatorah napryazheniya dlya energopotrebitel'ej (Consideration of transformer core non-linearity in static voltage controllers for power consumers)», *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 3, pp. 35-39, 2015 (in Russian).
- [13] G.G. Rekus and M.G. Chirkov, «O vozdejstvii garmonik na nagrev asinhronnyh dvigatelej (About effect of harmonics on warming-up of asynchronous motors)», *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij SSSR. Energetika (Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations)*, vol. 3, pp. 34-38, 1965 (in Russian).

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков

## ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследований потерь на вихревые токи  $P_{вп}$  от нормальной составляющей магнитного потока  $\Phi_n$  в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов. Актуальность исследований обусловлена высоким уровнем потерь  $P_{вп}$ , формирующихся в условиях резкого поверхностного эффекта, в общем приросте потерь в стыках. Задача решается на физической модели потерь в стыках  $P_{вп}$  при воздействии равных переменных магнитных потоков перпендикулярно плоскости прямоугольной стальной пластины в двух узких крайних зонах. Предложенная физическая модель состоит из двух одинаковых намагничивающих устройств и позволяет создавать согласное, как у стыков типа «step-lap», или встречное, как у стыков типа «butt-lap», направление магнитных потоков  $\Phi_n$ . Возможно изменение расстояния и взаимного углового положения между полюсами для исследования пластин разной формы. Показано, что в шихтованных сердечниках для стыков «step-lap» при прочих равных условиях уровень потоков  $\Phi_n$  вдвое выше, чем для стыков «butt-lap». На основании анализа результатов физического моделирования сделаны выводы о возможности оптимизации потерь в обоих типах стыков.

**Ключевые слова:** коэффициент динамики, нормальная составляющая магнитного потока, перекрытие стыков, потери в стыках, резкий поверхностный эффект, ступенчатые стыки, стыки внахлест, физическая модель, шихтованный сердечник, эффект взаимной компенсации вихревых токов.

### 1. Актуальность

Потери в стыках по ряду причин являются мало изученной частью потерь холостого хода шихтованных сердечников (ШС) силовых трансформаторов [1]. В рамках общепринятой структуры потерь в стали теоретическими исследованиями не удается выявить отличительных признаков, связанных с формированием потерь на этих особых участках [2-4].

Качественно новые результаты позволяют получить изменение подхода к структуре прироста удельных потерь в стыках разделением на гистерезисно-вихревые потери  $\Delta P_{уд.гв}$  от основного тангенциального магнитного потока  $\Phi_t$  и вихревые  $P_{уд.вл}$  от (перпендикулярного к плоскости

пластин ШС) нормального потока  $\Phi_n$ , образующегося при переходе в соседние слои шихтовки [5]. Действие переменного  $\Phi_n$  приводит к развитию резкого поверхностного эффекта (РПЭ) в пластинах [6]. Экспериментами по разделению прироста потерь в косых стыках внахлест типа «*butt-lap*» [5, 7] установлено, что для текстурованных сталей доминирующая доля прироста удельных потерь приходится на потери  $P_{уд.вл}$ , то есть большая часть процессов, связанная с потерями в стыках, протекает в условиях резкого поверхностного эффекта [7, 8]. Физические условия динамических процессов в зоне стыков принципиально отличаются от сформулированных в материалах [2, 3].

Сравнительные эксперименты, проведенные на магнитопроводах трехфазных трансформаторов из обычной стали и перспективных текстурованных сталей [9], показывают, что при общем снижении потерь холостого хода происходит возрастание относительного уровня удельных потерь в стыках. Это подтверждается и проведенными расчетами [7]. Подобные негативные явления еще более проявляются с внедрением ступенчатых косых стыков типа «*step-lap*» [10, 11].

## II. Постановка задачи

Весь рабочий магнитный поток ШС упорядочен по слоям шихтовки в соответствии с используемой конструкцией стыков. На рис. 1 изображены две одинаковые группы пластин одного слоя шихтовочной позиции сердечника с одинаковыми уровнями тангенциального потока слоя  $\Phi_t$  для двух типов стыков: внахлест – «*butt-lap*» и ступенчатых – «*step-lap*». Показана структура магнитного потока на границах с учетом потоков, проходящих через воздушные зазоры слоя –  $\Phi_\delta$ . В стыках внахлест магнитный поток слоя  $\Phi_n$  при переходах из слоя в слой делится пополам: вверх и вниз, образуя в зонах перекрытия стыков  $t$  симметричные встречные потоки –  $\frac{1}{2}\Phi_n$  (рис. 1, а) на двух половинах слоя шихтовки [12]. При ступенчатых стыках нормальный поток в зонах перекрытия  $t$  входит и выходит из слоя, не меняя направление, образуя согласные потоки полной величины –  $\Phi_n$  (рис. 1, б) [13]. Таким образом, величины нормальных потоков в слоях шихтовки двух рассматриваемых типов стыков с учетом наличия потоков  $\Phi_\delta$  отличается практически вдвое. Контуры вихревых токов от потоков  $\Phi_n$  в двух типах стыков (рис. 1) также будут различаться.

Для амплитуды рабочего магнитного потока  $\Phi_{рм}$  отдельного стержня (или ярма) ШС, состоящего из многих слоев шихтовки, справедливо равенство:

$$\Phi_{рм} = \sum \Phi_{тм} = \sum \Phi_{лм} + \sum \Phi_{дм}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{тб}}$ ,  $\Phi_{\text{лм}}$ ,  $\Phi_{\text{дм}}$  – амплитуды соответствующих составляющих магнитного потока одного слоя.

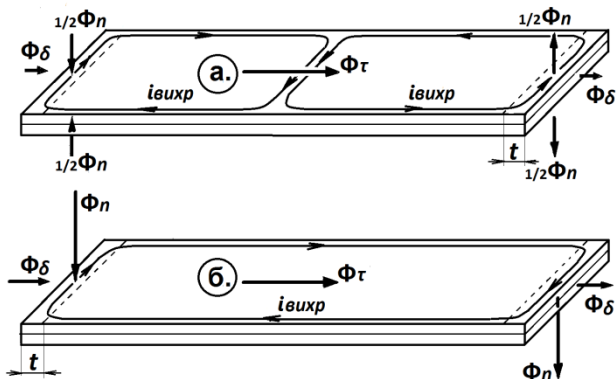


Рис. 1. Составляющие магнитного потока в зоне стыков пластин: внахлест – типа «butt-lap» (а) и ступенчатых – типа «step-lap» (б)

Таким образом, суммарная величина магнитных потоков  $\Phi_n$ , создающих потери на вихревые токи в стыках  $P_{\text{вт}}$  при РПЭ, по величине сопоставима с рабочим потоком  $\Phi_p$ .

В работе [7] при рассмотрении поверхностного эффекта в проводящей пластине при  $\mu = \text{const}$  вводится параметр динамики поверхностного эффекта  $\xi$ , определяющий относительную величину глубины проникновения электромагнитной волны в пластину.

Значение параметра  $\xi$  определяется выражением:

$$\xi = l \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}, \quad (2)$$

где  $l$  – меньший из линейных поперечных размеров пластины;  $\mu = \mu' \cdot \mu^0$  – произведение относительной магнитной проницаемости материала  $\mu'$  на проницаемость вакуума  $\mu^0$ ,  $\gamma$  – удельная электропроводность материала.

При  $\xi \leq (1,5 \div 2)$ , что соответствует режимам перемагничивания электротехнических сталей от тангенциального магнитного потока  $\Phi_\tau$ , в качестве меньшего поперечного размера  $l$  в формуле (2) для потока  $\Phi_\tau$  выступает толщина пластин  $d$ .

Формула потерь на вихревые токи  $P_{\text{уд.вт}}$  от потока  $\Phi_\tau$  имеет известный вид [4]:

$$P_{\text{уд.вт}} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \sigma} \cdot B_m^2 \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot f^2. \quad (3)$$



С наступлением РПЭ в пластине (при значении  $\xi \geq 4$ ) формула удельных потерь на вихревые токи  $P_{уд.вн}$  для потока  $\Phi_n$  принимает вид:

$$P_{уд.в.н} = \frac{\pi^{1.5}}{2 \cdot \sigma} \cdot B_m^2 \cdot b \cdot f^{1.5} \cdot \sqrt{\gamma/\mu}. \quad (4)$$

Для магнитного потока  $\Phi_n$ , нормального к плоскости пластин, минимальным линейным размером, реально ограничивающем действие вихревых токов, является ширина пластин сердечника  $b$  [6], а не ширина перекрытия  $t$ , как это полагается в [2, 3, 10]. При этом перемагничивание происходит при малых индукциях, соответствующих слабой нелинейности  $\mu$  [6]. Результаты исследований [6, 7] показали, что для нормального потока в стыках ШС силовых трансформаторов значения параметра динамики превышают  $\xi > 10$ . Контуры вихревых токов при этом будут вытесняться к поверхности по периметру пластин (рис. 1).

Возникает необходимость в углубленном изучении динамики перемагничивания в зоне стыков. Исследования на физической модели № 1 потерь на вихревые токи от действия нормального потока  $P_{вн}$  для стыков внахлест типа «butt-lap», проведенные в [12, 13], позволили установить некоторые особенности, связанные с формированием потерь  $P_{вн}$  в косых стыках внахлест. К достоинствам физической модели № 1 следует отнести равенство магнитных потоков  $\Phi_n$  и неизменность расстояния между граничными поверхностями полюсов. Но ограниченные возможности модели № 1 не дают возможности провести подобный анализ для ступенчатых косых стыков – «step-lap». Конструктивные особенности физической модели №1 [13] не позволяют произвести сравнительную оценку действия встречных и согласных потоков  $\Phi_n$  (рис. 1), изучить влияние на потери  $P_{вн}$  размеров перекрытия  $t$  и длины пластин  $L$ .

На основе усовершенствования физической модели расширен диапазон исследований.

### III. Описание физической модели и требований к эксперименту

Физическая модель № 2 для исследования потерь на вихревые токи  $P_{вн}$  в стыках от нормальных потоков  $\Phi_n$  в отличие от модели № 1 [12, 13] состоит из двух намагничивающих устройств (НУ): НУ1 и НУ2 с одинаковыми разрезными П – образными ленточными сердечниками (рис. 2). Намагничивающие обмотки обоих НУ, имеющие одинаковые параметры, включены параллельно к регулируемому источнику питания (автотрансформатору на частоте сети  $f = 50$  Гц).

В смежных полюсах НУ создаются равные по амплитуде переменные магнитные потоки, которые в зависимости от взаимного включения концов обмоток позволяют создать согласное или встречное направление магнитных потоков  $\Phi_n$  полюсов (на рис. 2 представлен вариант согласных потоков  $\Phi_n$ ). Ширина полюсов намагничивающих устройств увеличена с

$L_{\text{пол}} = 16$  мм до  $L_{\text{пол}} = 26$  мм, что расширяет возможности экспериментов; длина полюсов  $b = 100$  мм сохранена, как у физической модели № 1, для сопоставимости результатов измерений. Образец строго фиксируется между полюсами НУ в плоскости разреза сердечников. Нижние половины НУ1 и НУ2 с обмотками – закреплены (рис. 2), верхние – ярма, подвижные. Имеются зажимы для фиксации обоих НУ совместно с испытуемым образцом. Для контроля потоков  $\Phi_n$  непосредственно на образце по обоим краям предусмотрены две одинаковые локальные обмотки  $W_o$  в зоне расположения его под полюсами НУ1, НУ2, как это показано на рис. 2.

Возможно изменение расстояния между полюсами НУ1 – НУ2, а также их взаимного углового расположения. Поэтому длина испытуемых образцов  $L$  может меняться, а форма – отличаться от прямоугольной (трапеция, сектор кольца и т.д.).

Таким образом, в концевых зонах образца создаются нормальные к плоскости пластины потоки  $\Phi_n$ , которые могут соответствовать условиям перемагничивания косых стыков типа: «step-lap» или «butt-lap». Сменные образцы прямоугольной формы имеют ширину  $b = 100$  мм, такую же, как длина полюсов НУ (рис. 2). Намагничивающие обмотки НУ1 – НУ2 выполнены медным проводом с числами витков  $W_n = 240$  и имеют общее сопротивление при параллельном соединении  $R_M = 1,32$  Ом.

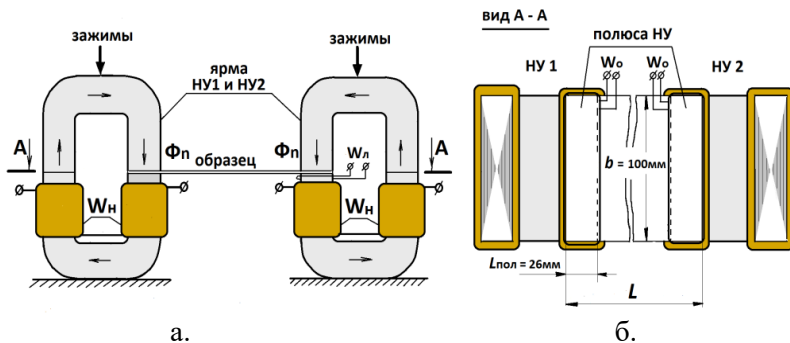


Рис. 2. Намагничивающие устройства НУ1 и НУ2:

с образцом прямоугольной формы (а);  
расположение образца с обмотками  $W_o$  в зоне под полюсами НУ (б)

Амплитуда потоков  $\Phi_n$  при измерениях контролируется по э.д.с. локальных обмоток с одинаковым числом витков:  $W_n = 3$  – на полюсе НУ2 и  $W_o = 3$  в крайних зонах образца, соответствующих потокам полюсов (рис. 2). Для обеспечения условия  $\xi \geq 10$ , как и в физической модели № 1 [12, 13], материал пластин должен иметь желательно большие значения произ-

ведения ( $\mu \cdot \gamma$ ), а толщина пластин  $d$  – соответствовать условию достаточного уровня потерь при проведении измерений ваттметровым методом.

Выбор в [12, 13] в качестве материала для образцов физической модели № 1 конструкционной стали марки Ст.3 при исследовании потерь  $P_{вн}$  оказался оправданным. Эта сталь доступна, удобна в обработке, ее магнитные свойства не чувствительны к механическим и температурным воздействиям. Удельная электропроводность  $\gamma$  стали Ст.3 в 5 раз выше, чем у сталей с содержанием  $S_i \approx 3\%$  [4], а магнитная проницаемость  $\mu'$  в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки согласно проведенным исследованиям находится в одном диапазоне значений с трансформаторными сталями:  $40 < \mu' < 100$ .

Уравнение баланса мощностей для физической модели № 2 сохраняет вид [13]:

$$P_n = P_M + P_{ст} + P_{вн}, \quad (5)$$

где  $P_M = I^2 \cdot (R_M + R_W)$  – потери в меди;  $I$  – ток в цепи намагничивания;  $R_W$  – сопротивление токовой цепи ваттметра;  $P_{ст} = P_{ст}(B_{м.ср})$  – потери в стали НУ;  $B_{м.ср}$  – средняя по сечению полюса амплитуда магнитной индукции, равная:  $B_{м.ср} = E_{л} / (4,44 \cdot f \cdot W_{л} \cdot S_{пол})$ ;  $E_{л}$  – действующее значение э.д.с. датчика  $W_{л}$ ,  $S_{пол}$  – площадь сечения полюса в зоне локальной обмотки  $W_{л}$ .

При отсутствии образца  $P_{вн} = 0$ . Из опыта холостого хода НУ1 – НУ2 потери  $P_{ст}$  для различных  $\Phi_n$  находятся с использованием формулы (5), как разность:

$$P_{ст} = P_n - P_M. \quad (6)$$

Исследования на физической модели проводились при условии, чтобы значения амплитуд  $B_{м.ср}$  магнитных потоков  $\Phi_n$  находились в ненасыщенных режимах намагничивания стальных образцов:  $B_{м.ср} < 0,6$  Тл.

С использованием формулы (6) в качестве примера по результатам измерений определены и представлены в табл. 1 потери  $P_{ст}$  для нескольких значениях индукции  $B_{м.ср}$  полюсов НУ при соответствующих  $E_{л}$ .

Таблица 1.  
Зависимость  $P_{ст}$  ( $B_{м.ср}$ ) из опыта холостого хода НУ

$E_d, В$	$B_{м.ср}, Тл$	$I, А$	$P_n, Вт$	$P_m, Вт$	$P_{ст}, Вт$
0,6	0,35	0,81	3,0	0,87	2,13
0,8	0,46	1,08	5,3	1,54	3,76
1,0	0,58	1,33	8,2	2,33	5,85

Искомые потери  $P_{вн}$  в образце определяются из (5), как:

$$P_{вн} = P_n - (P_m + P_{ст}). \quad (7)$$

При измерениях потерь из-за высокой температурной зависимости электропроводности стали [4] поддерживалось условие:  $t^o = \text{const}$  за счет принудительного охлаждения образца. Сравнительные измерения потерь  $P_n$  при согласных (+) и встречных (-) потоках  $\Phi_n$  производились при одном зажатии образца.

#### IV. Исследование эффекта уменьшения потерь $P_{вн}$ в стыках на образцах (165x100) мм из стали Ст.3

Для испытаний на физической модели № 2 подготовлены образцы из холоднокатаной стали Ст.3,  $d = 1,5$  мм,  $\gamma = 1 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu' \approx 40$ ,  $\xi \approx 28$ , с размерами, как в работе [13], (165x100) мм.

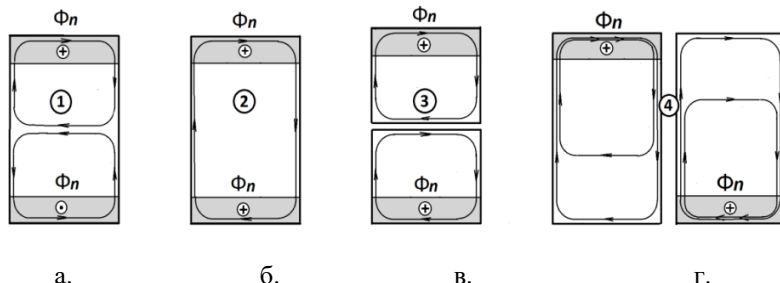
При изучении специфики формирования потерь на вихревые токи  $P_{вн}$  от действия нормальных потоков  $\Phi_n$  в узких крайних зонах стыков стальных пластин ШС учитывалось, что каждый из потоков полюсов индуцирует свои вихревые токи, контуры которых вытесняются к наружному периметру пластины. В связи с этим рассмотрены четыре варианта взаимодействия потоков и образцов (рис. 3):

1 – потоки полюсов направлены встречно; вихревые токи, замыкающиеся по всему периметру образца, взаимно компенсируются; остаются только симметричные малые контуры токов (рис. 3, а);

2 – согласное действие потоков полюсов; преобладают вихревые токи, замыкающиеся по контуру образца (рис. 3, б);

3 – действие потоков полюсов происходит на образце (рис. 3, в), разрезанном поперек; на половинках образца отсутствует взаимное влияние вихревых токов двух полюсов;

4 – поток каждого полюса действует на целую пластину (рис. 3, г) без влияния другого полюса; используются два одинаковых образца, каждый – с одним потоком  $\Phi_n$  полюса на одной стороне образца; действие вихревых токов каждого полюса распространяется на целый образец.



а. б. в. г.

Рис. 3. Варианты исследования эффекта уменьшения потерь на вихревые токи  $P_{вп}$  в стыках на физической модели № 2: встречные потоки (а); согласные потоки (б); независимые потоки на образце (в), разрезанном поперек; независимые потоки в двух изолированных образцах (г)

Представленные в табл. 2 результаты измерений показывают, что самый высокий уровень потерь на вихревые токи  $P_{вп}$  в варианте 4 при независимом действии каждого из потоков  $\Phi_n$  в целой пластине. При согласных потоках (вариант 2) потери значительно ниже – на  $(9 \div 11)$  %. При этом они оказываются даже на  $(3 \div 5)$  % ниже, чем на половинах пластин (рис. 3, в) с независимыми потоками (вариант 3). Наибольшего уровня взаимная компенсация потерь на вихревые токи  $P_{вп}$  –  $(14 \div 16)$  % по отношению к варианту 4 достигает в варианте 1 с встречными потоками  $\Phi_n$  (табл. 2).

Таким образом, при одинаковом уровне потоков  $\Phi_n$  образцов в вариантах 1 и 2, их размерах  $(165 \times 100)$  мм, то есть отношением  $L/b = 1,65$  и коэффициенте динамики  $\xi \approx 28$  разница в потерях  $P_{вп}$  составляет около  $(5 \div 6)$  % из-за разного уровня взаимной компенсации потерь.

Таблица 2.

Потери  $P_{вп}$  в образцах Ст.3  $(165 \times 100)$  мм,  $d = 1,5$  мм (холоднокатаная), при различных условиях действия потоков  $\Phi_n$

$E_l, В$	Вар. 1		Вар. 2		Вар. 3		Вар. 4
	$P_{вп}, Вт$	% к 4	$P_{вп}, Вт$	% к 4	$P_{вп}, Вт$	% к 2	$P_{вп}, Вт$
0,6	18,5	-16,2	19,7	-9,1	20,6	+4,6	21,5
0,8	35,5	-14,1	37,5	-10,8	38,7	+3,2	40,5
1,0	57,8	-15,7	60,8	-10,0	63,5	+5,4	66,9
$\delta P_{ср}, \%$	- $(14 \div 16)$ %		- $(9 \div 11)$ %		+ $(3 \div 5)$ %		-

### V. Зависимость потерь $P_{вп}$ от длины образцов $L$

Исследование зависимости потерь от отношения линейных размеров  $P_{вп}$  ( $L/b$ ) при согласных (+) и встречных (-) потоках  $\Phi_n$  проведено на

образцах из горячекатаной стали Ст.3 ( $\gamma$  и  $\mu'$  – те же, что и в разделе IV),  $d = 1,5$  мм;  $b = 100$  мм при значениях  $L = (82; 120; 165; 200)$  мм.

Результаты измерений (табл. 3) показывают, что эффект взаимной компенсации потерь имеет выраженную зависимость от  $L/b$ . Относительная разность потерь  $\delta P_{вн}$ , равная:

$$\delta P_{в} \cdot (L/b) = \frac{[P_{вн(+)} - P_{вн(-)}]}{P_{вн(-)}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

резко возрастает при малых значениях  $L/b$ : при  $L/b = 0,82$  – до 36,3 % и асимптотически снижается до 3 % при  $L/b = 2$ .

Таблица 3.

Потери  $P_{вн}$  в образцах из Ст.3,  $d = 1,5$  мм, (горячекатаная), при изменении длины  $L$  для согласных – (+) и встречных – (–) потоках  $\Phi_n$

$E_{л}, В$	$P_{вн}, Вт$							
	$L/b = 0,82$		$L/b = 1,2$		$L/b = 1,65$		$L/b = 2,0$	
	+	–	+	–	+	–	+	–
0,6	20,7	15,1	19,5	17,2	18,9	17,9	19,0	18,5
0,8	38,8	28,0	36,3	31,8	35,2	32,9	35,2	34,2
1,0	60,8	45,7	57,6	51,2	55,9	52,7	56,1	54,3
$\delta P_{ср}, \%$	36,3 %		13,3 %		6,2 %		3,0 %	

## VI. Зависимость потерь $P_{вн}$ от ширины зоны перекрытия $t$

Изменение величины перекрытия стыка  $t$  на физической модели № 2 на каждом этапе осуществлено частичным симметричным выведением концевых частей образца из полюсов НУ, с замером (линейкой) ширины зоны перекрытия и последующим зажатием в полюсах.

Диапазон изменения перекрытия стыка:  $t = (26; 17; 13; 6)$  мм. Для контроля потока  $\Phi_n$  на образце из горячекатаной стали Ст.3,  $d = 1,5$  мм, (200x100) мм по краям в зонах полюсов, расположены локальные датчики с числом витков  $W_0 = 3$ , как это показано на рис. 2, б. Результаты измерений представлены в табл. 4.

При наибольшем значении  $t$ , соответствующем ширине полюса  $L_{пол} = 26$  мм, по датчику  $W_{л}$  на полюсе НУ установлены режимы э.д.с.  $E_{л}$  (графа 2), сделаны измерения потерь  $P_{вн}$  (графа 3) измерения и зафиксировано равенство соответствующих действующих значений э.д.с.  $E_0$  датчиков  $W_0$  (графа 1). При каждом значении  $t$  для обеспечения равенства потоков полюсов НУ  $\Phi_{nm} = \text{const}$  необходимым условием является поддержание одинаковых значений  $E_0$  обеих обмоток  $W_0$  (графа 1). Из этого условия в

соответствии с новыми значениями  $E_{л}$  (графы 4; 6; 8) проведены необходимые измерения и по формулам (6), (7) определены величины потерь  $P_{вп}$  (графы 5; 7; 9). По данным табл. 4, в пределах точности эксперимента можно сделать вывод, что при варьировании зоны перекрытия в 4 раза с 26 мм до 6 мм в каждом режиме с постоянной амплитудой потока в зоне перекрытия  $\Phi_{лм} = \text{const}$  потери  $P_{вп}$  практически не зависят от ширины перекрытия  $t$  (графы 3, 5, 7, 9).

Таблица 4.  
Потери  $P_{вп}$  в образце из стали Ст.3 (200x100) мм,  
 $d = 1,5$  мм (горячекатаная), при различных  $t$

$E_{о}, В$	$t = 26$ мм		$t = 17$ мм		$t = 12$ мм		$t = 6$ мм	
	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$	$E_{л}, В$	$P_{вп}, Вт$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,365	0,4	8,9	0,470	8,4	0,530	8,6	0,772	9,14
0,460	0,5	14,3	0,595	13,8	0,661	13,4	0,990	14,0
0,556	0,6	20,3	0,712	19,4	0,800	20,1	1,22	18,9
0,648	0,7	27,7	0,832	26,9	0,932	27,3	–	–

## VII. Зависимость потерь $P_{вп}$

### от количества рассеченных частей $N$ пластины

Исследования зависимостей  $P_{вп}(N)$  проведены на образцах из холоднокатаной стали Ст.3  $d = 1,5$  мм, ранее использовавшихся в [13]. Комплект стальных пластин изготовлен лазерной резкой (ширина прорезей  $h_{пр} \leq 0,2$  мм) и включает образцы (165x100) мм: без рассечения (сплошного) и с разным количеством рассечений: – 1; 3; 5; 7; 11, разделяющих ширину образца на равные части с числом  $N = 2; 4; 8; 12$ .

На каждом образце измерения потерь  $P_{п}$  проведены при согласных (+) и встречных (–) потоках для трех режимов  $\Phi_{л}$ . Для сплошного образца ( $N = 1$ ) результаты измерения потерь  $P_{п}$  расположены в табл. 1 (варианты 1 и 2); при  $N = 2; 4; 8; 12$  – сведены в табл. 5.

В работе [13] для анализа зависимостей использовано приведение результатов к относительным величинам. В качестве таких величин приняты следующие переменные в относительных единицах:

$N \approx b / b_{э}$ , – количество частей с эквивалентной шириной –  $b_{э}$ , на которые продольными прорезями делится образец шириной –  $b$ ;

$P_{вп}^* = P_{впN} / P_{вп}$  – относительные значения потерь  $P_{впN}$  в расщепленных образцах (при  $N > 1$ ), к потерям  $P_{вп}$  в сплошном образце.

Таблица 5.

Потери  $P_{вн}$  при различном  $N$  в образцах из Ст.3 (165x100) мм,  $d = 1,5$  мм (холоднокатаная), для согласных – (+) и встречных – (–) потоков  $\Phi_n$

$E_{л}, В$	$P_{вн}, Вт$							
	$N = 2; \xi \approx 14$		$N = 4; \xi \approx 7$		$N = 8; \xi \approx 3,5$		$N = 12; \xi \approx 2,3$	
	+	–	+	–	+	–	+	–
0,6	14,1	13,2	8,01	7,45	3,86	3,70	2,77	2,41
0,8	27,0	25,3	15,5	14,4	7,65	7,11	5,36	4,83
1,0	43,4	41,1	25,5	23,6	12,5	11,3	8,37	7,91
$P_{вн}^*$	0,715	0,712	0,41	0,406	0,20	0,198	0,14	0,134

Приведенные в табл. 5 данные свидетельствуют, что усредненные значения  $P_{вн}^*$  при различных  $N$  для согласных и встречных потоков  $\Phi_n$  практически одинаковые. На рис. 4, а представлена зависимость  $P_{вн}^*(N)$ , полученная на физической модели № 2 для согласных и встречных потоков  $\Phi_n$  – (кривая 2); для сравнения приводится аналогичная кривая, полученная в [13] при встречных потоках  $\Phi_n$  на физической модели №1 – (кривая 1). Соответственно, подтверждается полученный ранее данные в [13] значительного спада потерь  $P_{вн}$  в стыках на пластинах с прорезями.

На рис. 4, б аналогичным образом представлены зависимости  $S(N)$ , полученные на физических моделях № 1 и № 2. При этом  $S$  является показателем степени зависимостей относительного снижения потерь  $P_{вн}^*(N)$  вида:

$$P_{вн}^*(N) = (1/N)^S \quad (9)$$

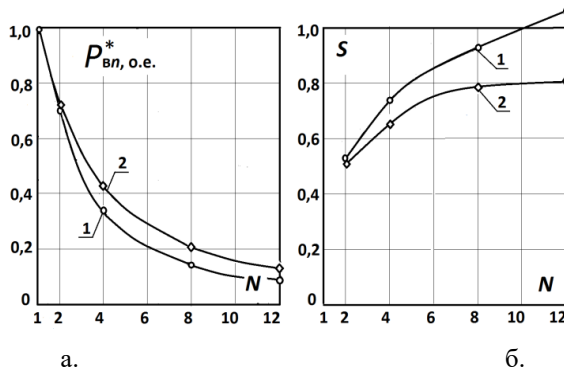


Рис. 4. Зависимости  $P_{вн}^*(N)$  (а) и  $S(N)$  (б):

- 1 – полученные на физической модели № 1 [13] при встречных потоках  $\Phi_n$ ;  
2 – на физической модели № 2 при согласных и встречных потоках  $\Phi_n$



Из сопоставления зависимости  $S(N)$  с приведенными в табл. 5 значениями  $\xi$  при различных  $N$  следует, что при РПЭ  $S \approx 0,5$ , а с выходом из РПЭ –  $S \approx 0,8$ .

### VIII. Обсуждение результатов

Исследования на физической модели показали следующие результаты, которые изложены ниже в четырех пунктах.

1. Обнаруженный в работе [13] эффект снижения потерь  $P_{вп}$ , обусловленный взаимной компенсацией вихревых токов от магнитных потоков  $\Phi_n$  полюсов имеет место как при встречном (–), так и при согласном (+) направлении потоков. В обоих случаях потери  $P_{вп}$  оказываются меньше, чем при независимом действии каждого потока в целой пластине, или ее половине (табл. 2). Эффект снижения потерь асимптотически уменьшается с ростом отношения линейных размеров пластины  $L/b$ . Так, при изменении отношения размеров  $L/b$  от 1,65 до 2 происходит снижение соотношения потерь  $P_{вп}$  вариантов согласных (+) и встречных (–) потоков  $\Phi_n$  с 6 % до 3 % (табл. 3).

Таким образом, при одинаковой ширине пластин и одинаковых потоках в косых стыках типа «butt-lap» и «step-lap» уровень потерь  $P_{уд-вп}$  будет примерно одинаковым, но для обеспечения условия одинаковых потоков стыков число пластин в слое шихтовки стыков типа «step-lap» должно быть вдвое меньше, чем у стыков типа «butt-lap».

2. С учетом итогов результатов предыдущих экспериментальных исследований потерь в стыках кольцевого шихтованного сердечника в работах [5, 7] и физического моделирования потерь на вихревые токи при резком поверхностном эффекте ( $\xi > 4$ ) от потоков  $\Phi_n$  в двух крайних противоположно расположенных зонах стальной пластины – в [12, 13] можно сделать вывод, что составляющая удельных потерь на вихревые токи в от нормального потока стыках  $P_{уд-вп}$  зависит от тех же параметров, что в формуле (4) для потока, равномерно распределенного по всей длине проводящей пластины, при  $\mu = \text{const}$  [6]. Однако изменяется характер зависимости от линейного размера  $b$ :

$$P_{уд.вп} \equiv \left( \Phi_{нм}^2; \sqrt{b}; f^{1,5}; \sqrt{\gamma/\mu} \right). \quad (10)$$

3. При продольном рассечении стальной пластины пропорционально снижается уровень динамики, в соответствии со значением  $\xi$  по формуле (2), и потери  $P_{уд-вп}$  асимптотически уменьшаются (рис. 4, а).

С ростом числа рассеченных частей пластины  $N$  режим перематничивания постепенно выходит из условия резкого поверхностного эффекта (табл. 5). Характер зависимости  $P_{уд-вп}$  в стыках от эквивалентной ширины пластины  $b_3 = b/N$  меняется в соответствии с показателем степени  $S(N)$

(рис. 4). При приближении к диапазону значений  $\xi < 2$ , потери  $P_{уд.вл}$  будут уже зависеть от параметров, формулы (3), но с другим характером зависимости от линейного размера  $b_3$ :

$$P_{уд.вл} = [\Phi_{nm}^2; \gamma; b_3^{S(N)}; f^2]. \quad (11)$$

4. Установлено, что на потери  $P_{вл}$  не оказывает заметного влияния размер перекрытия стыка  $t$ .

Выбор в работах [2, 3] в качестве линейного параметра, ответственного за динамические процессы в зоне стыков шихтованного сердечника, –  $t$  является некорректным, поскольку этот размер никак не ограничивает контуры вихревых токов в пластинах (рис. 1).

Исследования, проведенные в [5], и на физической модели № 2 подтвердили, что при изменении  $t$  с контролем постоянства амплитуды потоков  $\Phi_{nm} = \text{const}$  потери  $P_{вл}$  практически не изменяются (табл. 3).

### IX. Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

- характер зависимости удельных потерь на вихревые токи в стыках  $P_{уд.вл}$  от амплитуды магнитного потока  $\Phi_{nm}$ :  $P_{уд.вл} \equiv \Phi_{nm}^2$ , удельной электропроводности  $\gamma$  и магнитной проницаемости  $\mu$  стали в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки пластины:  $P_{уд.вл} \equiv \sqrt{(\gamma/\mu)}$ , ширины пластин  $b$ :  $P_{уд.вл} \equiv \sqrt{b}$ ;
- при выполнении условия  $\Phi_{nm} = \text{const}$  практически не наблюдается какой-либо зависимости удельных потерь  $P_{уд.вл}$  от ширины перекрытия стыков  $t$ ;
- эффект взаимной компенсации вихревых токов имеет место в обоих типах стыков, но в стыках внахлест типа «butt-lap» он несколько выше, чем в ступенчатых стыках типа «step-lap»;
- эффект взаимной компенсации вихревых токов и различие потерь  $P_{вл}$  в стыках типов «butt-lap» и «step-lap» при  $\Phi_{nm} = \text{const}$  снижаются при увеличении отношения линейных размеров пластин  $L/b$ ;
- при продольном рассечении пластины с ростом числа рассеченных частей пластины  $N$  наблюдается одинаковое для рассматриваемых типов стыков уменьшение потерь  $P_{вл}$ .

По результатам исследований сформулируем три основных вывода.

1. С помощью физических моделей определены зависимости потерь на вихревые токи от нормального магнитного потока в стыках шихтованного сердечника раздельно по каждому из влияющих факторов: амплитуды магнитного потока, частоты перемагничивания, ширины и длины пластин, удельной электропроводности и магнитной проницаемости стали.

Показано, что не наблюдается зависимости потерь на вихревые токи от величины перекрытия стыка.

2. Проведено сопоставление результатов исследования для двух основных типов косых стыков: внахлест типа «*butt-lap*» и ступенчатых типа «*step-lap*».

3. Исследована возможность снижения потерь на вихревые токи от нормального потока в стыках при продольном рассечении стальных пластин шихтованного сердечника. Это преследует цель последующей оптимизации потерь в пределах рассматриваемых типов стыков.

© Калинин Е.В., 2019

© Чивенков А.И., 2019

### Библиографический список

- [1] Лизунов С.Д. Итоги Сессии СИГРЭ 1988г. Трансформаторостроение // Электричество. 1989. № 8. С. 37-45.
- [2] Černý V. Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů // Elektrotechnický obzor, SV72. 1983. № 11. P. 651-652.
- [3] Nakata T., Kawase Y., Moriyasa S. Magnetic characteristics of the joints of the stator core segments // Denki Gakkaui Rhombusini. 1987. № 1 (107). P. 109-114.
- [4] Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей. Москва: Энергия, 1974. – 240 с.
- [5] Калинин Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть. 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник статей IV Всерос. научн.-техн. конф., Н. Новгород. 2018. С. 53-61.
- [6] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Москва: Изд-во Энергия, 1967. – 208 с.
- [7] Калинин Е.В., Чернов А.И. Потери в стыках шихтованных сердечников. Исследование возможностей снижения прироста потерь // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 4 (123). С. 123-134.
- [8] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. С. 87-101.
- [9] Moses A.J., Sakaida A. Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels // IEEE Transactions on Magnetics. 1986. № 22 (5). P. 532-534.
- [10] Левин М.И., Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехника і Електромеханіка. 2014. № 1. С. 40-43.
- [11] Nakata T., Takahashi N., Kawase Y. Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores // IEEE Transactions on Magnetics. 1982. № 6 (18). P. 1055-1057.

- [12] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Физическая модель потерь в стыках шихтованных сердечников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 1 (124). С. 109-118.
- [13] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Анализ конструкций стыков шихтованных магнитных систем силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1 (5). С. 69-83.

**E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov**

## **STUDY OF MAGNETIC FLOW NORMAL COMPONENT IN JOINTS OF LAMINATED CORES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The article presents the results of studies of eddy current losses  $P_{en}$  from the normal component of the magnetic flux  $\Phi_n$  at the joints of the laminated cores of the power transformer. The relevance of the studies is due to the high level of losses  $P_{en}$  formed under the conditions of a sharp surface effect, in the overall increase in losses at the joints. The problem is solved on the physical model of losses at the joints  $P_{en}$  under the influence of equal variable magnetic fluxes perpendicular to the plane of a rectangular steel plate in two narrow extreme zones. The proposed physical model consists of two identical magnetizing devices and allows one to create a consonant direction of the magnetic fluxes  $\Phi_n$ , like for joints of the «step-lap» type, or a counter direction, like of joints of the «butt-lap» type. It is possible to change the distance and mutual angular position between the poles to study plates of different shapes. The article presents the results of research, identified dependencies and effects. It has been shown that in laminated cores for joints «step-lap», ceteris paribus, the level of fluxes  $\Phi_n$  is twice as high as for joints «butt-lap». According to the results of the analysis of the results of physical modeling, conclusions are made about the possibility of optimizing losses in both types of joints.

**Keywords:** butt-lap, dynamic coefficient, laminated core, loss at the joints, normal component of the magnetic flux, overlap of joints, physical model, sharp surface effect, step-lap, the effect of mutual compensation of eddy currents.

### **References**

- [1] S.D. Lizunov, «Results of the 1988 session of CIGRE. Manufacture of transformers», *Elektrichestvo*, vol. 8, pp. 37-45, Aug. 1989 (in Russian).
- [2] V. Černý, «Přispěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů», *Elektrotechnický obzor, SV72*, vol. 11, pp. 651-652, 1983 (in Czech).
- [3] T. Nakata, Y. Kawase and S. Moriyasa, «Magnetic characteristics of the joints of the stator core segments», *Denki Gakkai Rombunsi. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap.*, vol. 1, pp. 109-114, 1987.

- 
- [4] V.V. Druzhinin, *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley (Magnetic properties of electrical steel)*. Moscow: Energiya, 1974, P. 240 (in Russian).
- [5] E.V. Kalinin, «Poteri v stykah shihtovannykh serdechnikov. Chast' 1. Ehksperimental'noe issledovanie osnovnykh vliyayushchih faktorov prirosta ehlektromagnitnykh poter' (Losses at the joints of the laminated cores. Part. 1. An experimental study of the main influencing factors of the increase in electromagnetic losses) », in *proc IV All-Russian conf. Aktual'nye problemy energetiki (Actual problems of the electric power industry)*, pp. 53-61, 2018 (in Russian).
- [6] J. Lammeraner and M. Shtafl, *Vikhrevyye toki (Eddy Currents)*. Moscow: Energiya, 1967 (in Russian).
- [7] E.V. Kalinin and A.I. Chernov, «Losses at the joints of laminated cores. investigation of the possibilities of reducing the increase of losses», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (123), pp. 123-134, 2018(in Russian).
- [8] E.V. Kalinin and A. I. Chivenkov. «Forecasting the increase of losses in joints of power transformers core», *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 87-101, 2018.
- [9] A.J. Moses and A. Sakaida, «Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels», *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 22, no. 5, pp. 532-534, Sep. 1986 (in Russian).
- [10] M.I. Levin, I.V. Pentegov, S.V. Rymar and A.V. Lavrenyuk, «Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs», *Electrical engineering & Electromechanics*, vol. 1, pp. 40-43, 2014 (in Russian).
- [11] T. Nakata, N. Takahashi and Y. Kawase, «Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores», *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 6, no. 18, pp. 1055-1057, Nov. 1982.
- [12] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov. «Physical model of losses at joints of laminated cores», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 1 (124), pp. 109-118, 2019.
- [13] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov. «Analysis of constructions of joints of laminated magnetic systems of power transformers», *Smart electrical engineering*, no. 1 (5), pp. 69-83, 2019 (in Russian).

УДК 621.311

О.В. Маслеева, Н.И. Эрдили

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экономического исследования энергетической составляющей жизненного цикла возобновляемых источников энергии – ветровых и солнечных энергоустановок, мини-гидроэлектростанций (ГЭС). Получены данные по материальной составляющей каждого этапа жизненного цикла, на основе этих данных выполнен расчет расхода электроэнергии по каждому этапу. С учетом тарифов на электроэнергию региона, где расположены предприятия, рассчитана стоимость электрической энергии на производство и утилизацию возобновляемых источников энергии. Расчеты показали, что наиболее экономичными являются мини-ГЭС, а наиболее затратными – солнечные энергоустановки.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, оценка жизненного цикла, энергетическая составляющая.

### 1. Введение

Растущее отрицательное воздействие традиционной энергетики на окружающую среду, постоянный рост энергопотребления и энергетических полезных ископаемых актуализируют развитие экологически более чистых видов производства энергии. Для реализации «низкоуглеродных» сценариев развития экономики предлагается постепенный отказ от традиционных путей развития энергетики, реализация широкомасштабных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

В настоящее время мощность возобновляемой электроэнергетики в России составляет порядка 0,2 % всей установленной мощности, а годовая выработка электроэнергии на этих электростанциях достигает 0,4 % от общей выработки электроэнергии в стране.

Известно, что ВИЭ практически не загрязняют природную среду в процессе эксплуатации, однако экологической информации о процессе их производства и утилизации очень мало. Поэтому для реализации энергетической политики необходимо изучить техническую, экономическую и экологическую составляющие ВИЭ.

Одним из методов экологической оценки загрязнения окружающей среды является метод «оценки жизненного цикла» (ОЖЦ) [2]. Оценка жизненного цикла включает в себя: рассмотрение всего жизненного цикла объекта, начиная от добычи полезных ископаемых, далее производство материалов, изготовление источников энергии, их применения и утилизации после окончания срока службы.

На рис. 1 показаны: добыча железной руды (1), выплавка стали (2), производство солнечной энергоустановки (3), процесс ее эксплуатации (4), утилизация – переплавка после окончания эксплуатации (5).

## II. Исходные данные для оценки жизненного цикла

Жизненный цикл представляет собой совокупность единичных процессов, связанных между собой материальными и энергетическими потоками.

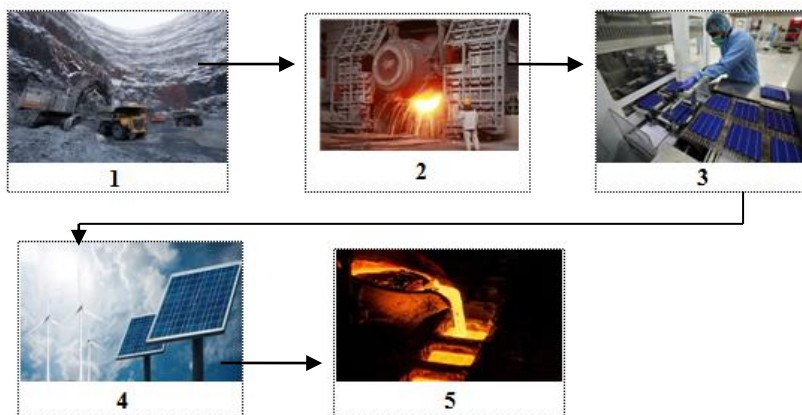


Рис. 1. Этапы жизненного цикла энергоустановок

Комплексная оценка включает в себя следующие составляющие:

- потребление природных ресурсов;
- потребление электроэнергии;
- уровень загрязнения окружающей среды.

Исходными данными для проведения ОЖЦ являются, во-первых, материальные и энергетические входные и выходные потоки по каждому этапу; во-вторых, виды и объемы загрязнений окружающей среды по каждому этапу.

В данной работе приведены результаты исследований энергетического потока жизненного цикла ВИЭ – ветровых (ВЭУ) и солнечных энергоустановок (СЭУ), мини-гидроэлектростанций (ГЭС). На рис. 2 показан единичный процесс производства мини-ГЭС. Входной поток показывает,

какие материальные и энергетические ресурсы необходимы для работы данного предприятия. К ним относятся поступающие материалы, воздух, вода, тепло-электроэнергия, земля. Выходным потоком является готовая продукция – мини-ГЭС. Процесс производства сопровождается загрязнением окружающей природной среды – выбросами вредных веществ в атмосферу, сточные воды и образующиеся отходы в почву. Кроме этого, происходит физическое загрязнение природы – воздействие шума, вибрации, различного вида излучений.

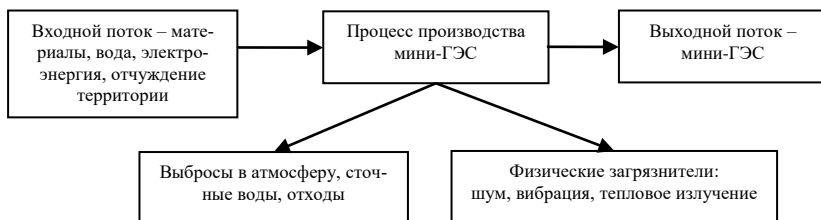


Рис. 2. Единичный процесс производства мини-ГЭС

Технические характеристики ветровых и солнечных ЭУ, мини-ГЭС представлены в табл. 1 [3-5].

Таблица 1.  
Технические характеристики ВИЭ

Вид ВИЭ	Марка ЭУ	Характеристики	Полная масса, кг
ВЭУ	«Муссон»	Мощность 30 кВт	3184
Мини-ГЭС	ИНСЭТ Пр 30	Мощность 30 кВт	2000
СЭУ	Saana 250 LM3 MBW	Мощность 0,25 кВт, 120 шт.	8536

Для определения массы материалов на каждом этапе жизненного цикла первоначально определили массу материалов, из которых состоят ВИЭ. Для сокращения объема анализируемой информации и исключения особенностей установок разных производителей рассматриваются материалы только основных элементов, масса которых составляет более 95 % от общей массы структурного элемента установки [6]. Данные были взяты их технической документации. Массы материалов указаны в табл. 2.



Таблица 2.  
Массы материалов, из которых состоят энергоустановки

Вид ВИЭ	Масса материалов энергоустановки, кг					
	Сталь	Медь	Алюминий	Стекло	Кремний	Пластмасса
ВЭУ	3056	38				100
СЭУ	6000		276	1920	340	
мини-ГЭС	1962	38				

Отходы образуются на каждом этапе жизненного цикла при добыче полезных ископаемых, в металлургии, машиностроении, нефтехимии и т.д. С учетом удельной массы образующихся отходов [7], была рассчитана масса материалов каждого этапа до необходимой массы природных ресурсов (табл. 3). Электроэнергия необходима на осуществления технологических процессов на всех этапах жизненного цикла. Исходя из ориентировочных норм удельного расхода электроэнергии для различных видов промышленности, которые были приняты в соответствии с [8], был рассчитан расход электроэнергии, который приведен в табл. 3.

### III. Расчет затрат на электроэнергию

Стоимость электроэнергии была определена с учетом тарифов регионов [9], в которых находятся места добычи природных ресурсов, металлургические и машиностроительные предприятия. Принято, что утилизация отходов будет проводиться в Нижегородской обл. Подробные результаты расчета затрат на электроэнергию по этапам жизненного цикла ВИЭ приведены в табл. 3. Суммарные результаты расчета затрат на электроэнергию приведены на рис. 3, 4.

Таблица 3.  
Результаты расчета расхода электроэнергии и затрат на электроэнергию по материалам и этапам жизненного цикла ВИЭ

Вид материала	Процесс	Масса, т	Расход электроэнергии, кВт*ч	Сумма, руб.
ВЭУ				
Сталь	Добыча	13,9	945	3478
	Металлургия	3,942	59	203
	Машиностроение	3,056	153	611
	Утилизация	3,056	458	1522

Продолжение табл. 3

Вид материала	Процесс	Масса, т	Расход электроэнергии, кВт*ч	Сумма, руб.
Медь	Добыча	3,064	31	113
	Металлургия	0,049	20	73
	Машиностроение	0,038	2	8
	Утилизация	0,038	2	6
Пластмасса	Добыча	0,102	0,51	1
	Производство	0,10	38	102
	Машиностроение	0,10	5	18
СЭУ				
Сталь	Добыча	27,2	1850	6807
	Металлургия	7,74	116	398
	Машиностроение	6	300	1512
	Утилизация	6	900	2988
Алюминий	Добыча	7,121	142	527
	Металлургия	0,356	6408	23710
	Машиностроение	0,276	14	70
	Утилизация	0,276	28	92
Стекло	Добыча	4,992	24,96	89
	Производство	1,92	115,2	381
	Утилизация	1,92	115,2	382
Кремний	Добыча	0,874	4	4
	Производство	0,336	4049	4089
мини-ГЭС				
Сталь	Добыча	8,9	605	2227
	Металлургия	2,531	38	130
	Машиностроение	1,962	98	424
	Утилизация	1,962	294	977

Окончание табл. 3

Вид материала	Процесс	Масса, т	Расход электроэнергии, кВт*ч	Сумма, руб.
Медь	Добыча	3,064	31	113
	Металлургия	0,049	20	73
	Машиностроение	0,038	2	8
	Утилизация	0,038	2	6

Таблица 4.

Результаты расчета расхода электроэнергии по этапам жизненного цикла ВИЭ

Вид ВИЭ	Расход электроэнергии, кВт*ч			
	Добыча	Производство	Утилизация	Всего
ВЭУ	976	276	460	1713
СЭУ	2021	11002	1043	14066
мини-ГЭС	636	158	296	1090

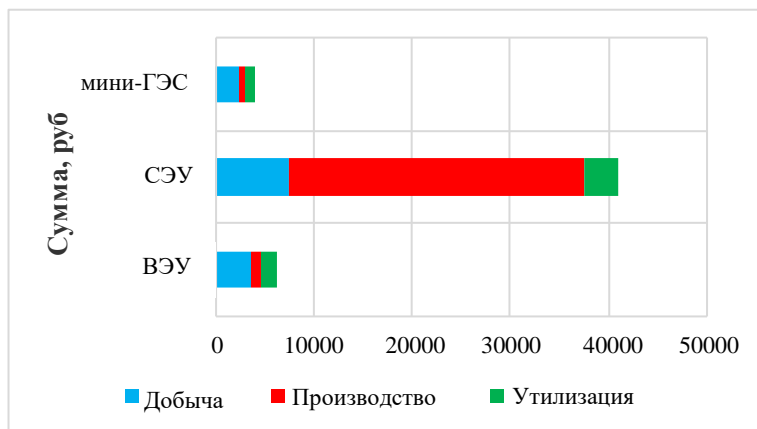


Рис. 3. Результаты расчета затрат на электроэнергию по этапам жизненного цикла ВИЭ

Стоимость оплаты электроэнергии складывалась с учетом каждого этапа жизненного цикла. Расход электроэнергии и, соответственно, ее оплата на порядок выше у СЭУ за счет использования алюминия для производства корпуса СЭУ, которое является самым энергоемким из производства всех металлов. Самым экономичным является жизненный цикл ВЭУ за счет меньшей массы установки.

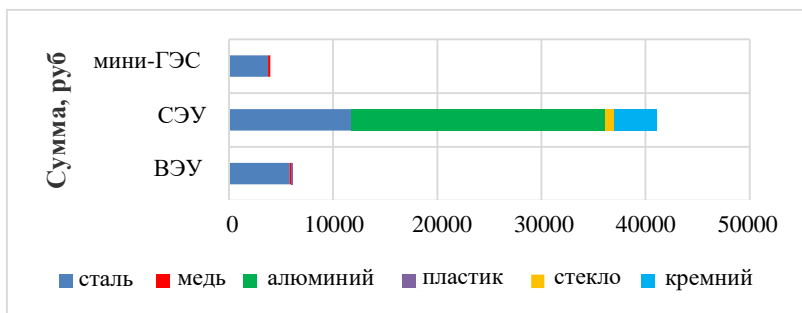


Рис. 4. Результаты расчета затрат на электроэнергию по материалам ВИЭ

Результаты расчета затрат на электроэнергию по материалам, используемым в производстве ВИЭ, показывают вклад каждого материала в жизненный цикл. Исходя из этого, можно определить наиболее энергозатратные материалы и наметить пути оптимизации. Наибольший расход электроэнергии требуется для производства алюминия, следующим идет производство кремния. Оба процесса имеют высокие удельные расходы на процесс производства.

#### IV. Выводы

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- расчет расхода и затрат на электроэнергию позволяет оценить наиболее энергоемкие составляющие жизненного цикла и также сравнивать различные источники энергии;
- к наиболее экономным по этим параметрам относятся мини-ГЭС, а наиболее затратными являются СЭУ;
- основная доля расхода электроэнергии у СЭУ приходится на этап производства за счет использования алюминия в конструкции корпуса СЭУ, процесс производства которого относится к наиболее энергоемким;
- анализ расхода электроэнергии позволяет наметить пути по снижению расхода электроэнергии в процессе жизненного цикла ВИЭ.

© Маслеева О.В., 2019

© Эрдили Н.И., 2019

### Библиографический список

- [1] Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики», утверждена постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 321. [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70544238/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70544238/) (дата обращения: 31.05.2019).
- [2] Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Крюков Е.В. Сравнительная экологическая оценка установок нетрадиционной энергетики // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 3-10.
- [3] Техническое описание ветрогенераторов семейства Муссон. [Электронный ресурс]. URL: [http://elvision.ru/catalog/visten/vgrt/vgmus/vgmus\\_59.html](http://elvision.ru/catalog/visten/vgrt/vgmus/vgmus_59.html) (дата обращения: 31.05.2019).
- [4] Гидроагрегат Пр30 с пропеллерной турбиной. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.inset.ru/r\\_offers/Pr-30.htm](http://www.inset.ru/r_offers/Pr-30.htm) (дата обращения: 03.06.2019).
- [5] Монокристаллические модули Saana 245-260 LM3 MBW. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.multiwood.ru/pv/S245-260LM3MBW> (дата обращения: 04.06.2019).
- [6] Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Крюков Е.В. Экологическая оценка процесса производства возобновляемых источников энергии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С.174-180.
- [7] Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления [Электронный ресурс]. URL: [http://www.recyclers.ru/uploads/library/specific\\_showing.pdf](http://www.recyclers.ru/uploads/library/specific_showing.pdf) (дата обращения: 23.05.2019).
- [8] Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. 3-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 2009. – 392 с.
- [9] Тарифы на электроэнергию по регионам России в 2018 году. [Электронный ресурс]. URL: [https://worknet-info.ru/read-blog/1142\\_таблица-тарифов-на-электроэнергию-по-регионам-россии-в-2018-году.html](https://worknet-info.ru/read-blog/1142_таблица-тарифов-на-электроэнергию-по-регионам-россии-в-2018-году.html) (дата обращения: 24.05.2019).

**O.V. Masleeva, N.I. Erdili**

## **ECONOMIC ANALYSIS OF ENERGY COMPONENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES LIFE CYCLE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The article presents the results of an economic study of the energy component of the life cycle of renewable energy sources – wind and solar power plants, mini-hydroelectric power stations. Data were obtained on the material component of each

stage of the life cycle, on the basis of which the calculation of the energy consumption for each stage was performed. Taking into account electricity tariffs in the region where the enterprises are located, the cost of electric energy for the production and utilization of renewable energy sources is calculated. Calculations have shown that mini-hydroelectric power plants are the most economical source of renewable energy, and solar power plants are more expensive.

**Keywords:** energy component, life cycle assessment, renewable energy sources.

### References

- [1] The state program of the Russian Federation «Energy Efficiency and Energy Development» was approved by the Decree of the Government of the Russian Federation, vol. 321, April 15, 2014. [Online]. Available at: URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70544238> [Accessed: May 31, 2019] (in Russian).
- [2] E.N. Sosnina, O.V. Masleeva and E.V. Kryukov, «Comparative environmental assessment of unconventional power installations», *Thermal Engineering*, vol. 62, no. 8, pp. 539-546, 2015.
- [3] Technical Description of the Monsoon Family Wind Generators [Online]. Available at: [http://elvision.ru/catalog/visten/vgrt/vgmus/vgmus\\_59.html](http://elvision.ru/catalog/visten/vgrt/vgmus/vgmus_59.html) [Accessed: May 31, 2019] (in Russian).
- [4] Pr30 hydraulic unit with propeller turbine [Online]. Available at: [http://www.inset.ru/r\\_offers/Pr-30.htm](http://www.inset.ru/r_offers/Pr-30.htm) [Accessed: June 3, 2019] (in Russian).
- [5] Monocrystalline modules Saana 245-260 LM3 MBW [Online]. Available at: <http://www.multiwood.ru/pv/S245-260LM3MBW> [Accessed: June 4, 2019] (in Russian).
- [6] E.N. Sosnina, O.V. Masleeva, G.V. Pachurin and E.V. Kryukov, «Environmental assessment of the production of renewable energy», *Modern Problems of Science and Education*, vol. 6, pp.174-180, 2013.
- [7] Collection of specific indicators of production and consumption waste generation/ [Online]. Available at: [http://www.recyclers.ru/uploads/library/specific\\_showing.pdf](http://www.recyclers.ru/uploads/library/specific_showing.pdf) [Accessed: May 23, 2019] (in Russian).
- [8] I.G. Karapetyan, D.L. Faybisovich and I.M. Shapiro, *Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey (Reference for the design of electrical networks)*, 3 ed. Moscow: NC ENAS, 2009 (in Russian).
- [9] Tariffs for electricity by region of Russia in 2018 [Online]. Available at: [https://worknet-info.ru/read-blog/1142\\_таблица-тарифов-на-электроэнергию-по-регионам-россии-в-2018-году.html](https://worknet-info.ru/read-blog/1142_таблица-тарифов-на-электроэнергию-по-регионам-россии-в-2018-году.html) [Accessed: May 24, 2019] (in Russian).

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.3

**М.В. Ильин<sup>1</sup>, И.В. Гуляев<sup>1</sup>,  
F. Briz del Blanco<sup>2</sup>, Е.А. Вилков<sup>1</sup>**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЗАИМНОГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ СИЛОВЫХ КРИСТАЛЛОВ IGBT-МОДУЛЯ**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н. П. Огарева

<sup>1</sup> Университет Овьедо, Испания

Описан подход к определению степени взаимного теплового влияния силовых полупроводниковых приборов в составе IGBT-модуля силового преобразователя. Новизна подхода заключается в определении величины взаимовлияния кристаллов на основании решения системы линейных уравнений и представления результатов в аналитическом виде, которые позволяют быстро и точно воспроизвести тепловые режимы силовых приборов с помощью тепловой модели основанной на электротепловой аналогии. Результаты моделирования показывают возможность использования цепей Фостера совместно с нелинейными элементами взаимосвязей для расчета тепловых режимов и сокращения времени моделирования и вычислительных ресурсов. Данная тепловая модель позволяет уточнить предсказание температуры при существенном тепловом взаимном влиянии кристаллов в режиме формирования инвертором низкочастотного тока нагрузки. Оценка тепловых параметров для создания модели силового модуля на основе метода электротепловой аналогии производилась путем исследования трехмерной модели IGBT модуля в среде ANSYS с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** IGBT модуль, метод конечных элементов, тепловая модель, тепловые взаимосвязи кристаллов, электротепловая аналогия.

## 1. Введение

В настоящее время на производстве широко используются мощные электродвигатели. В зависимости от целей и задач использования, они работают на различную нагрузку и поддерживают различные скоростные режимы. Для управления электродвигателями используются преобразователи частоты, реализующие определенные законы управления. В современных преобразователях частоты все чаще используются силовые IGBT транзисторы, имеющие множество преимуществ по сравнению с полевыми и биполярными транзисторами, а также и тиристорами. Одной из тенденций развития этого направления является использование силовых IGBT транзисторов и диодов в интегрированном модуле.

Несмотря на общее повышение качества изделия и экономическую эффективность в результате применения интегрированных силовых модулей в преобразователях частоты, при работе силовых элементов в составе модуля увеличивается влияние тепловых эффектов. Использование нескольких силовых полупроводниковых приборов (СПП) в едином корпусе ухудшает тепловые характеристики каждого прибора в отдельности, что ведет к снижению времени безотказной работы модуля и соответственно преобразователя в целом. Прогнозирование тепловых режимов имеет первостепенную важность для повышения эксплуатационных свойств преобразователя. Для прогнозирования тепловых режимов данных силовых модулей разрабатываются тепловые модели, позволяющие определить температуру кристалла в любой момент времени [1]. Рабочие частоты тока двигателя зависят от конкретного его применения. Поскольку существуют такие режимы эксплуатации, в которых требуется частота питающего тока, измеряемая единицами герц, постольку за время одного периода выделения мощности потеря тепло успевает распространиться от нагреваемого кристалла к соседним кристаллам и изменить их тепловой режим. Данный эффект должен обязательно учитываться в тепловых моделях. Неправильное определение тепловых нагрузок, например, в момент старта двигателя, когда могут наблюдаться существенные перегрузки, может привести к накоплению ошибки при прогнозировании температуры в дальнейшем, и в предельном случае может привести к отказу модуля до срабатывания защиты от перегрева.

Существующие методы определения температуры кристаллов СПП хорошо зарекомендовали себя в случае дискретных силовых приборов. Одними из наиболее применимых видов моделей являются тепловые модели, основанные на электротепловой аналогии. Однако такие тепловые модели дают существенную погрешность при определении температуры кристаллов в модульной конструкции из-за отсутствия учета эффекта теплового взаимовлияния кристаллов друг на друга [2-3].



Таким образом, для уточнения тепловых режимов работы силового преобразователя на низких частотах, необходимо использовать тепловые модели, учитывающие тепловые взаимосвязи силовых кристаллов модуля.

## II. Определение сопротивлений тепловых взаимосвязей

На основании электротепловой модели силового IGBT-модуля с дискретным представлением тепловых сопротивлений СПП [4-5], была разработана электротепловая модель для модуля PS22A78-E, учитывающая тепловые взаимосвязи силовых кристаллов IGBT-модуля. Модель с взаимосвязями представлена на рис. 1.

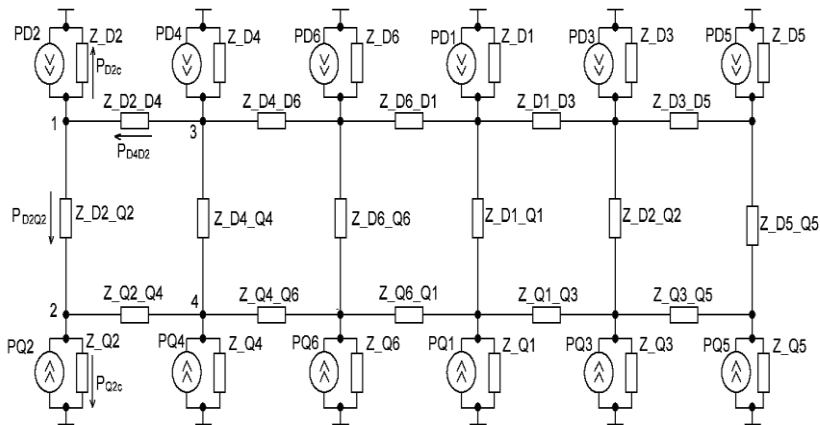


Рис. 1. Электротепловая модель IGBT-модуля PS22A78-E с тепловыми взаимосвязями между кристаллами

Данная модель содержит источники теплового потока  $PQ(D)n$ , которыми являются кристаллы СПП, собственные комплексные тепловые сопротивления кристаллов  $Z_Q(D)n$  в направлении кристалл-атмосфера, представляющие собой RC-цепь 5-го порядка типа Фостера и комплексные тепловые сопротивления взаимосвязей  $Z_Q(D)n_Q(D)k$ . Поскольку тепловые потоки зависят друг от друга, определить точно значение одного сопротивления взаимосвязи в конкретный момент времени невозможно. Поэтому необходимо нахождения всех взаимных сопротивлений одновременно с помощью системы уравнений.

Благодаря идентичности законов распространения тепла и электричества в электротепловых схемах, в соответствии первым законом Кирхгофа были составлены уравнения для всех узлов данной цепи. Пример систем уравнений (1) и (2) для крайних узлов № 1-2 и центральных узлов № 3-4 схемы приведен ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Q2} = P_{Q2c} + P_{Q2D2} + P_{Q2Q4} \\ P_{D2} = P_{D2c} + P_{D2Q2} + P_{D2D4} \\ P_{Q4} = P_{Q4c} + P_{Q4Q2} + P_{Q4D4} + P_{Q4Q6} \\ P_{D4} = P_{D4c} + P_{D4D2} + P_{D4Q4} + P_{D4D6} \\ \dots \end{array} \right. \quad (1)$$

Для удобства определения сопротивления в зависимости от направления тепловых потоков, переменные были разделены по знаку и переписаны в соответствии с тепловыми величинами.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Q2} = \frac{T_{Q2}}{R_{Q2c}} + \frac{T_{Q2D2}}{R_{Q2D2}} + \frac{T_{Q2Q4}}{R_{Q2Q4}} - \frac{T_{D2Q2}}{R_{D2Q2}} - \frac{T_{Q4Q2}}{R_{Q4Q2}} \\ P_{D2} = \frac{T_{D2}}{R_{D2c}} + \frac{T_{D2Q2}}{R_{D2Q2}} + \frac{T_{D2D4}}{R_{D2D4}} - \frac{T_{Q2D2}}{R_{Q2D2}} - \frac{T_{D4D2}}{R_{D4D2}} \\ P_{Q4} = \frac{T_{Q4}}{R_{Q4c}} + \frac{T_{Q4Q2}}{R_{Q4Q2}} + \frac{T_{Q4D4}}{R_{Q4D4}} + \frac{T_{Q4Q6}}{R_{Q4Q6}} - \frac{T_{Q2Q4}}{R_{Q2Q4}} - \frac{T_{D4Q4}}{R_{D4Q4}} - \frac{T_{Q6Q4}}{R_{Q6Q4}} \\ P_{D4} = \frac{T_{D4}}{R_{D4c}} + \frac{T_{D4D2}}{R_{D4D2}} + \frac{T_{D4Q4}}{R_{D4Q4}} + \frac{T_{D4D6}}{R_{D4D6}} - \frac{T_{D2D4}}{R_{D2D4}} - \frac{T_{Q4D4}}{R_{Q4D4}} - \frac{T_{D6D4}}{R_{D6D4}} \\ \dots \end{array} \right. \quad (2)$$

Поскольку неизвестных величин в уравнения больше, чем выражений для узлов схемы, система была намеренно переопределена. Так как значения искомого сопротивлений должны удовлетворять любому состоянию системы, из моделирования были получены значения температур и тепловых потоков для каждого элемента в случае единичного нагрева. При таком условии проведения моделирования, уравнения системы являются линейно независимыми, а, следовательно, для 12 узлов, полученных при отдельном нагревании 12 элементов, количество уравнений составило 144. В данном случае собственные сопротивления элементов могут рассматриваться как известные величины, или как искомые параметры.

Данная система была решена для каждого момента времени и для всех возможных направлений тепловых потоков. Исходя из решения системы, были построены зависимости теплового потока, протекающего от

кристалла к кристаллу, от разности температуры между кристаллами. Данные зависимости позволяют определить характер взаимосвязи элементов для исследования тепловой модели. Пример зависимостей продемонстрирован на рис. 2.

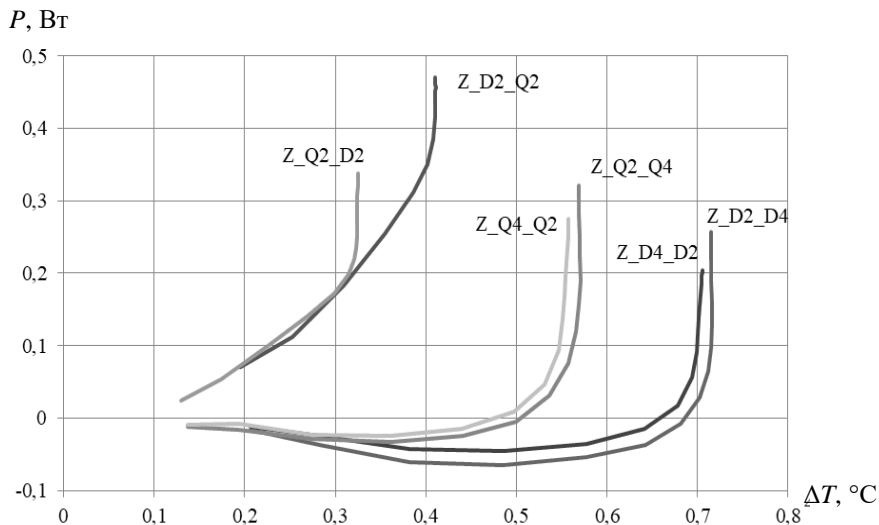


Рис. 2. Зависимости теплового потока, протекающего от кристалла к кристаллу, от разности температуры между кристаллами для кристаллов  $Q2$ ,  $Q4$ ,  $D2$  и  $D4$

Как видно из графика, наименьшим тепловым сопротивлением обладает взаимосвязь транзистор-диод. Кроме того, величина теплового потока при одной и той же разности температуры отличается в зависимости от направления его протекания.

Для взаимосвязей транзистор-транзистор и диод-диод характерно наличие отрицательных значений теплового потока, что говорит о наличии дополнительного источника тепла, в виде парного СПП. Поскольку распространение тепла от менее нагретого кристалла к более нагретому кристаллу невозможно, следует рассматривать момент перехода теплового потока через ноль, как граничное значение. Таким образом, тепловой поток от одного кристалла к другому будет распространяться только если разность температур между кристаллами превышает пороговое значение.

Разница значений для связей диод-диод и транзистор-транзистор в зависимости от направления распространения тепла не столь велика, как в

случае транзистор-диод, однако она есть. Значения сопротивлений транзистор-транзистор несколько меньше значений диод-диод. Это обусловлено конструктивно большей площадью поверхности транзисторов.

### III. Построение электротепловой модели

Для реализации данных зависимостей в среде схемотехнического моделирования PSIM были использованы нелинейные элементы, для которых необходимо было найти аналитические уравнения данных кривых и их первую производную. Был выбран полиномиальный способ аппроксимации, который с высокой точностью позволяет описать данные зависимости, и позволяет легко найти производную.

Для ограничения отрицательной области определения функции были введены идеальные диоды, которые не вызывают дополнительного падения напряжения. Для реализации собственного сопротивления кристаллов использовались RC-цепи 5-го порядка типа Фостера.

Фрагмент тепловой модели для элементов  $D2$ ,  $D4$ ,  $Q2$ ,  $Q4$  с нелинейными тепловыми взаимосвязями в среде схемотехнического моделирования PSIM изображен на рис. 3.

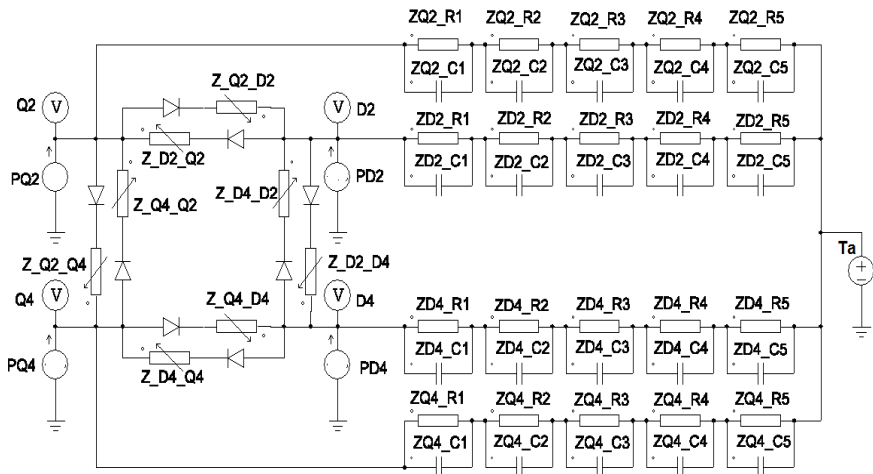


Рис. 3. Фрагмент электротепловой модели элементов  $D2$ ,  $D4$ ,  $Q2$ ,  $Q4$  с нелинейными связями в среде PSIM

В модели собственные сопротивления кристаллов представлены RC-цепями типа Фостера пятого порядка, элементы которых для теплового сопротивления и теплоемкости соответственно обозначены как  $ZQ(D)_n\_Ri$  и  $ZQ(D)_n\_Ci$ , где  $n$  – номер кристалла и  $i$  – номер элемента внутри цепи

собственного сопротивления кристалла  $n$ . Нелинейные элементы тепловых взаимосвязей обозначены  $Z\_Q(D)i\_Q(D)j$ , где  $i$  и  $j$  – номера кристаллов источника и потребителя теплового потока соответственно. Источниками мощности потерь для кристаллов транзисторов и диодов являются  $PQ2(4)$  и  $PD2(4)$  соответственно. Источник  $Ta$  имитирует температуру окружающей среды. Диоды в модели используются для разделения направлений протекания теплового потока.

Структура модели для остальных кристаллов модуля идентична структуре, представленной на рис. 3. В общей модели нелинейные тепловые взаимосвязи присутствуют между всеми кристаллами модуля. Исследование модели проводилось для режима работы инвертора, соответствующему питанию нагрузки синусоидальным током. Частоты питающего тока были выбраны таковыми, чтобы в первом случае проявление тепловой взаимосвязи не было существенным, что соответствует частоте 20 Гц, а во втором случае значительно был выражен эффект тепловой взаимосвязи – частота 1 Гц.

Результаты моделирования данной цепи с входным полусинусоидальным сигналом мощности с частотой 20 Гц для амплитуды 5 Вт приведены на рис. 4.

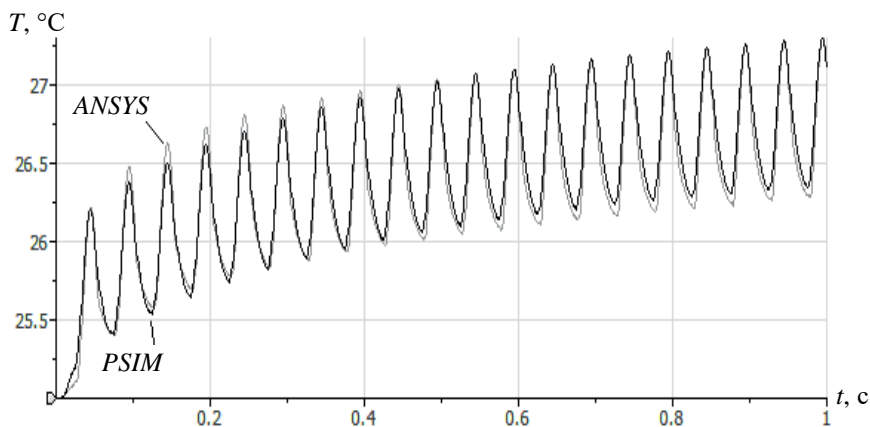


Рис. 4. Временные диаграммы температуры транзистора  $Q2$  на частоте 20 Гц: серый – результаты ANSYS, черный – результаты PSIM

Относительная погрешность оценки температуры на частоте 20 Гц изображена на рис. 5. В качестве эталона температуры использовались данные, полученные в результате исследования трехмерной модели в ANSYS.

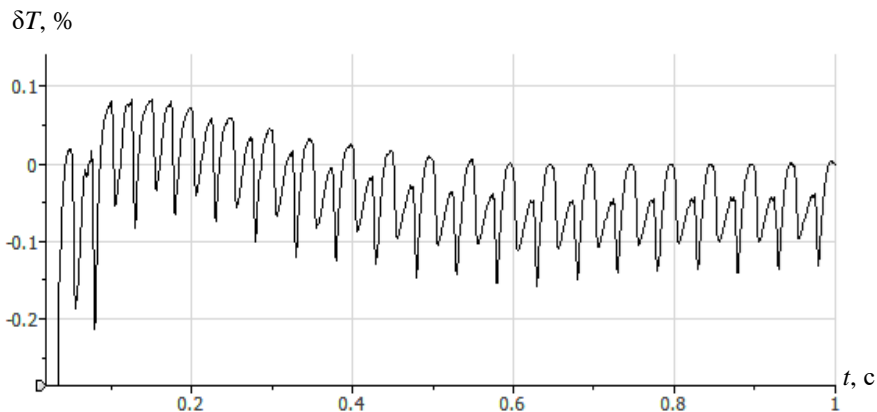


Рис. 5. Относительная ошибка температуры транзистора  $Q2$  на частоте 20 Гц

Результаты моделирования для частоты 1 Гц приведены на рис. 6.

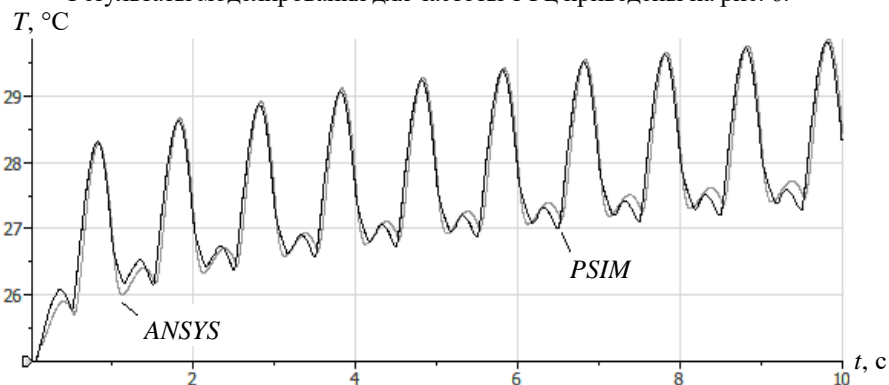


Рис. 6. Временные диаграммы температуры транзистора  $Q2$  на частоте 1 Гц: серый – результаты ANSYS, черный – результаты PSIM

Относительная погрешность оценки температуры изображена на рис. 7.

Применение полученных результатов было использовано при реализации ряда устройств [6-8]. Особенности практического использования данного подхода изложены в опубликованных работах [9, 10].

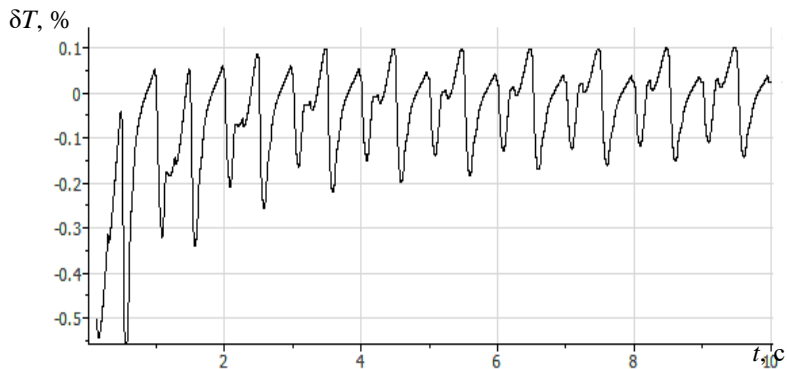


Рис. 7. Относительная ошибка оценки температуры транзистора  $Q2$  на частоте 1 Гц

Как видно из временных диаграмм на рис. 4 и 5, на относительно высоких частотах основными цепями кристаллов, влияющих на тепловой режим, являются цепи собственных сопротивлений кристаллов. Тепловое взаимодействие кристаллов очень слабо выражено. Относительная погрешность предсказания температуры не превышает 0,1 %.

В случае частоты 1 Гц проявляется влияние тепловой взаимосвязи в виде дополнительных пиков на временной диаграмме температуры. Введение нелинейных элементов позволило реализовать данный эффект и в электротепловой модели, что позволило достаточно точно предсказывать температуру и интервалах времени, когда существенно проявляется эффект тепловой взаимосвязи. Относительная погрешность предсказания температуры в состоянии теплового равновесия охладителя с окружающей средой не превышает 0,2 %. Как видно из диаграмм, применение нелинейных цепей в качестве тепловых взаимосвязей позволяет существенно улучшить предсказание температуры на низких частотах на интервалах времени, когда значительно проявляется тепловое взаимовлияния полупроводниковых элементов друг на друга и одновременно сохранить высокую точность определения температуры на относительно высоких частотах.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-20057П).*

© Ильин М.В., 2019

© Гуляев И.В., 2019

© Briz del Blanco F., 2019

© Вилков Е.А., 2019

## Библиографический список

- [1] Andresen M., Liserre M., Buticchi G. Review of active thermal and lifetime control techniques for power electronic modules // Proceedings of the 16th European Conference on Power Electronics and Applications, 2014, Lappeenranta, Finland. P. 1-10.
- [2] Khatir Z., Dupont L., Ibrahim A. Investigation on junction temperature estimation based on junction voltage measurements // Microelectronics Reliability. 2010. № 50 (9-11). P 1506-1510.
- [3] Ильин М.В., Вилков Е.А., Гуляев И.В., Бриз дель Бланко Ф. Определение собственных тепловых сопротивлений силовых транзисторов и диодов IGBT модуля на основе его трехмерной модели // Электротехника. 2019. № 7. С. 19-23.
- [4] Alavi O., Abdollah M., Viki A.H. Assessment of thermal network models for estimating IGBT junction temperature of a buck converter // Proceedings of the 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2017, Mashhad, Iran. P. 102-107.
- [5] Bahman A., Ma K., Blaabjerg F. A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. № 33 (3). P. 2518-2530.
- [6] Сонин Ю.П., Шакарян Ю.Г., Прусаков Ю.И., Юшков С.А., Гуляев И.В. Способ управления двигателем двойного питания, выполненным на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, и устройство для его осуществления, Пат. 1610589 РФ, опубл. 06.07.1987.
- [7] Сонин Ю.П., Шакарян Ю.Г., Юшков С.А., Прусаков Ю.И., Гуляев И.В. Бесконтактный асинхронизированный вентильный электродвигатель, Пат. 1561163 РФ, опубл. 27.10.1987.
- [8] Сонин Ю.П., Стромин Б.А., Тургенев И.В., Гуляев И.В. Исследование асинхронизированного вентильного двигателя // Электротехника. 1982. № 10. С. 49-51.
- [9] Бриз Дель Бланко Ф., Гуляев И.В., Ильин М.В., Попов А.А., Попова В.А. Оптимизация управления машиной переменного тока с анализом тепловых моделей силового модуля преобразователя. Саранск: Изд-во Мордовского унта, 2019. – 108 с.
- [10] Ильин М.В., Вилков Е.В., Гуляев И.В. Тепловая модель IGBT модуля с учетом тепловых взаимосвязей между кристаллами // Электротехника. 2019. № 1. С. 8-12.



M.V. Ilyin<sup>1</sup>, I.V. Gulyaev<sup>1</sup>,  
F. Briz del Blanco<sup>2</sup>, E.A. Vilkov<sup>1</sup>

## THE USE OF NONLINEAR ELEMENTS IN THERMAL MODEL TO PREDICT THERMAL COUPLING INFLUENCE OF POWER CRYSTALS OF IGBT MODULE

<sup>1</sup> National Research Ogarev Mordovia State University  
Saransk, Russia

<sup>2</sup> University of Oviedo  
Oviedo, Spain

**Abstract.** The article describes an approach to determining the degree of thermal coupling influence of power semiconductor devices as part of an IGBT module of a power converter. The novelty of the approach is to determine the degree of the interaction of crystals based on solving a system of linear equations and presenting the results in an analytical form that allow you to quickly and accurately reproduce the thermal conditions of power devices using a thermal model based on an electrothermal analogy. The simulation results show the possibility of using the Foster circuits in conjunction with nonlinear interconnection elements for calculating thermal modes and reducing the simulation time and computational resources. This thermal model allows us to refine the prediction of temperature with a significant thermal mutual influence of crystals in the mode of low-frequency load current by the inverter. Estimation of thermal parameters to create a model of a power module based on the electrothermal analogy method was carried out by researching the three-dimensional model of the IGBT module in the ANSYS environment using the finite element method.

**Key words:** electrothermal analogy, finite element method, IGBT module, thermal coupling, thermal model.

### References

- [1] M. Andresen, M. Liserre and G. Buticchi, «Review of active thermal and lifetime control techniques for power electronic modules», in proc. *16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, Lappeenranta, Finland, pp. 1-10.
- [2] Z. Khatir, L. Dupont and A. Ibrahim, «Investigation on junction temperature estimation based on junction voltage measurements», *Microelectronics Reliability*, vol. 50 (9-11), pp 1506-1510, Sept.-Nov. 2010.
- [3] M.V. Il'in, E.A. Vilkov, I.V. Gulyaev and F. Briz del Blanco, «Determining the self-thermal impedances of power transistors and diodes of an IGBT module based on its 3D model», *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, is. 7, pp. 491-495, July 2019.
- [4] O. Alavi, M. Abdollah and A.H. Viki, «Assessment of thermal network models for estimating IGBT junction temperature of a buck converter», in proc. *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 2017, Mashhad, Iran, pp. 102-107.

- [5] A. Bahman, K. Ma and F. Blaabjerg, «A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, is. 3, pp. 2518-2530, March 2018.
- [6] Yu.P. Sonin, Yu.G. Shakaryan, Yu.I. Prusakov, S.A. Yushkov and I.V. Gulyaev, «Sposob upravleniya dvigatelem dvoynogo pitaniya, vypolnennym na baze asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom, i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya (A method of controlling a dual-power motor made on the basis of an asynchronous motor with a phase rotor, and a device for its implementation) », R.F. Patent 1610589, July 6, 1987 (in Russian).
- [7] Yu.P. Sonin, Yu.G. Shakaryan, S.A. Yushkov, Yu.I. Prusakov, I.V. Gulyaev, «Beskontaktnyy asinkhronizirovanny ventil'nyy elektrodvigatel' (Contactless asynchronous valve motor)», R.F. Patent 1561163, Oct. 27, 1987 (in Russian).
- [8] Yu.P. Sonin, B.A. Stromin, I.V. Turgenov and I.V. Gulyaev, «Issledovaniye asinkhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelya (Investigation of an asynchronous valve motor)», *Russian Electrical Engineering*, vol. 10, pp. 49-51, 1982 (in Russian).
- [9] F. Briz del Blanco, I.V. Gulyaev, M.V. Ilyin, A.A. Popov and V.A. Popova, *Optimizatsiya upravleniya mashinoy peremennogo toka s analizom teplovykh modeley silovogo modulya preobrazovatelya (Optimization of control of an alternating current machine with analysis of thermal models of the converter power module)*. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2019 (in Russian).
- [10] M.V. Ilyin, E.A. Vilkov and I.V. Gulyaev, «A thermal model of an IGBT module taking into account thermal interconnections between chips», *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, is. 1, pp. 6-10, Jan. 2019.

## НАШИ АВТОРЫ

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**Бурковский Виктор Леонидович** – заведующий кафедрой Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук; **bvl@vorstu.ru**

**Герман Леонид Абрамович** – профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в г. Нижнем Новгороде, доктор технических наук; **lagerman@mail.ru**

**Данилов Александр Дмитриевич** – профессор Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук; **danilov@yandex.ru**

**Демидов Станислав Владимирович** – начальник Дорожной электротехнической лаборатории филиала ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковской дирекции по энергообеспечению; **ech2\_demidovsv@grw.ru**

**Калинин Евгений Владимирович** – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **chernmaza@yandex.ru**

**Карпов Иван Петрович** – старший электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории филиала ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковской дирекции по энергообеспечению; **ivankarpovrzd@yandex.ru**

**Крысанов Валерий Николаевич** – доцент Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук; **sovteh2000@mail.ru**

**Маслеева Ольга Владимировна** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **ovm1552@yandex.ru**

**Осокин Владимир Леонидович** – заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, кандидат технических наук; **osokinvl@mail.ru**

**Петров Алексей Евгеньевич** – магистрант Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина; **usetheforcealex@yandex.ru**

**Петушков Михаил Юрьевич** – профессор Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, доктор технических наук; **m.petushkov@magtu.ru**

**Погорелов Алексей Владимирович** – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; **pog\_alex31@mail.ru**

**Сарваров Анвар Сабулханович** – профессор Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, доктор технических наук; [anvar@magtu.ru](mailto:anvar@magtu.ru)

**Серебряков Александр Сергеевич** – профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, доктор технических наук; [a.sereb@mail.ru](mailto:a.sereb@mail.ru)

**Умяров Дамир Вафиевич** – начальник отдела электрооборудования конструкторского бюро по проектированию судов «Вымпел»;  
[umyarovdv@mail.ru](mailto:umyarovdv@mail.ru)

**Фёдоров Олег Васильевич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; [fov52@mail.ru](mailto:fov52@mail.ru)

**Филатова Галина Андреевна** – доцент Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина, кандидат технических наук; [fgala90@mail.ru](mailto:fgala90@mail.ru)

**Чивенков Александр Иванович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; [chyvenkov@mail.ru](mailto:chyvenkov@mail.ru)

**Эрдил Наталья Игоревна** – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; [erdili.ni@yandex.ru](mailto:erdili.ni@yandex.ru)

**Яблоков Андрей Анатольевич** – доцент Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина, кандидат технических наук; [andrewyablokov@yandex.ru](mailto:andrewyablokov@yandex.ru)

### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

**Вилков Евгений Александрович** – магистрант Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; [evgenvilkov1995@gmail.com](mailto:evgenvilkov1995@gmail.com)

**Гуляев Игорь Васильевич** – профессор Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, доктор технических наук; [ivgulyaev@mail.ru](mailto:ivgulyaev@mail.ru)

**Ильин Михаил Владимирович** – доцент Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, кандидат технических наук; [imikev@mail.ru](mailto:imikev@mail.ru)

**Fernando Briz del Blanco** – профессор Университета Овьедо (Испания), Ph.D.; [fernando@isa.uniovi.es](mailto:fernando@isa.uniovi.es)

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
n.a. R.E. ALEKSEEV**

# **SMART ELECTRICAL ENGINEERING**

**№ 3**

**Nizhny Novgorod 2019**

**Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2019. No. 3 (7). – 128 p.**

*The journal is issued 4 times in year*

**Editor-in-Chief A.B. Loskutov**

**EDITORIAL STAFF**

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),  
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),  
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

*Electronic version of the journal:  
<http://www.ie.nntu.ru>*

**CONTENTS**

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS.....</b>	<b>4</b>
<b>A.A. Yablokov, G.A. Filatova, A.E. Petrov</b> Research of fault location function in composition of information system .....	4
<b>I.P. Karpov, S.V. Demidov</b> Methods of diagnostics of AC contact network in post-emergency situations .....	14
<b>A.V. Pogorelov</b> Research of frequency responses of mine power supply system with passive filter – compensating devices .....	27
<b>D.V. Umiarov</b> Ensuring electromagnetic compatibility of electric receivers in power systems of vessels with electric motion at design stage..	36
<b>L.A. German, A.S. Serebryakov, V.L. Osokin</b> Method for regulating voltage at substation with single-sided power supply of AC network with unregulated power factor correction device .....	49
<b>M.Y. Petushkov, A.S. Sarvarov, O.V. Fedorov</b> Ways to solve problems in field of unregulated asynchronous electric drive in metallurgical industry .....	60
<b>V.N Krysanov, V.L Burkovsky, A.D Danilov</b> Expansion of functional capabilities of static power line voltage control devices .....	75
<b>E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov</b> Study of magnetic flow normal component in joints of laminated cores .....	86
<b>O.V. Masleeva, N.I. Erdili</b> Economic analysis of energy component of renewable energy sources life cycle .....	102
<b>POWER ENGINEERING .....</b>	<b>111</b>
<b>M.V. Ilyin, I.V. Gulyaev, F. Briz del Blanco, E.A. Vilkov</b> The use of nonlinear elements in thermal model to predict thermal coupling influence of power crystals of IGBT module .....	111
<b>Authors .....</b>	<b>123</b>

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**  
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
smart\_electric@nttu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 28.09.2019. Дата выхода в свет: 17.10.2019

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.