

**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 2018**

УДК 621.3  
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. № 3. – 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, доцент

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

**гл. редактор выпуска**

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук, доцент

**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>*

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....</b>	<b>4</b>
<b>Попель О.С., Тарасенко А.Б., Федотов А.А., Фрид С.Е.</b> Физическое моделирование работы гибридного накопителя электрической энергии при пуске двигателя в случае пониженных температур окружающей среды.....	4
<b>Коверникова Л.И., Лыонг В.Ч.</b> Особенности параметров режимов гармоник в узле присоединения целлюлозно-бумажного комбината к питающей сети .....	15
<b>Иванин О.А., Директор Л.Б.</b> Оценка эффективности системы электроснабжения сельского населенного пункта на базе газотурбинной установки .....	34
<b>Якупов А.М.</b> Исследование методики краткосрочного прогнозирования выработки солнечной электростанции.....	44
<b>Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Кобяков Д.С., Кшталтный Н.И., Юрлов М.Е.</b> Моделирование переходных процессов дизель-генераторных установок постоянной и переменной частоты вращения при параллельной работе.....	54
<b>Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л.</b> Определение параметров схемы замещения для расчета токов короткого замыкания при двухстороннем питании потребителей.....	63
<b>Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фигасов А.Н.</b> Расчетно-аналитическая модель для исследования влияния распределенной генерации на качество электрической энергии – колебания напряжения.....	74
<b>Калинин Е.В., Чивенков А.И.</b> Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов.....	87
<b>Голубев С.В.</b> Технические и экономические аспекты выбора энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии.....	102
<b>СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.....</b>	<b>114</b>
<b>Кузменков А.Н., Мирясов Г.М., Титов В.Г., Шахов А.В.</b> Расчет контуров регулирования электромагнитного подшипника.....	114
<b>Наши авторы .....</b>	<b>123</b>

---

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

---

**УДК 621.355****О.С. Попель<sup>1</sup>, А.Б. Тарасенко<sup>1</sup>, А.А. Федотов<sup>1,2</sup>, С.Е. Фрид<sup>1</sup>****ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ  
ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ЭНЕРГИИ ПРИ ПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ В СЛУЧАЕ  
ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Для многих промышленных объектов, расположенных в северных регионах России, важной проблемой является запуск двигателей внутреннего сгорания, работающих на органическом топливе. Статья посвящена физическому моделированию работы электрической схемы стартера при запуске двигателя при пониженных температурах окружающей среды. В качестве объектов испытаний были использованы свинцово-кислотный, щелочные и литий-ионный аккумуляторы, а также их комбинации с параллельно соединенной суперконденсаторной батареей на основе органического электролита. Соотношение пускового тока и энергоемкости аккумуляторной батареи подобрано в соответствии с типичными рабочими условиями для стартерных батарей (ток в три раза превосходит значение энергоемкости аккумуляторной батареи, выраженное в ампер-часах). Физическое моделирование запуска проведено с использованием климатической камеры КХТ-450М. При этом выполнялся разряд указанным током аккумуляторной батареи или параллельно соединенных аккумуляторной и суперконденсаторной батарей в течение 4 с. Получены экспериментальные данные о работе различных типов аккумуляторов в пусковом режиме при отрицательной температуре, включая характерные для этого режима значения токов и напряжений, на основе которых в дальнейшем можно судить о деградационном поведении аккумуляторов. При  $t = -23^{\circ}\text{C}$  ни одна из аккумуляторных батарей не обеспечила отдачу требуемого тока в течение 3 с, так как при этих попытках происходило падение напряжения ниже 8-10 В (нижняя граница допустимого напряжения выбиралась, исходя из рекомендаций производителей аккумуляторов). При параллельной работе с суперконденсаторной батареей емкостью 225 Ф требуемая отдача тока наблюдалась в экспериментах со всеми типами аккумуляторов. Таким образом, суперконденсаторная батарея существенно увели-

чивает вероятность успешного запуска двигателя в неблагоприятных погодных условиях. Наименьшее падение напряжения наблюдалось на никель-кадмиевой аккумуляторной батарее, комбинацию которой с суперконденсаторами можно считать оптимальным решением для работы в качестве стартерного модуля двигателя при отрицательных температурах. Вместе с тем, емкость суперконденсаторной батареи требует дальнейшей оптимизации.

**Ключевые слова:** гибридный накопитель, двигатель внутреннего сгорания, литий-ионный аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, суперконденсатор, физическое моделирование, холодный запуск двигателя, щелочной аккумулятор.

## I. Введение

Запуск двигателя внутреннего сгорания является большой проблемой для использования транспортных средств, работающих на жидком органическом топливе в регионах с низкой среднегодовой температурой [1]. Стартовый крутящий момент двигателя в традиционном транспорте обеспечен встроенной электрохимической батареей, как правило, это свинцово-кислотная (Pb-кислота), реже – никель-кадмиевая (Ni-Cd) батарея [2]. Различные аккумуляторы энергии работают в области отрицательных температур по-разному, соответственно, различным образом происходит и потеря мощности и энергоемкости. Из-за резко возрастающего сопротивления электролита и замедления электродных процессов падение напряжения на аккумуляторе до критических с точки зрения рабочих напряжений потребителя значений происходит быстрее, чем аккумулятор отдает требуемую энергию. Для электрохимических двойнослойных суперконденсаторов потеря мощности при температурах вплоть до  $-45^{\circ}\text{C}$  незначительна [3]. Большое количество заводов, рудников, месторождений полезных ископаемых в России находятся как раз в регионах с низкой среднегодовой температурой. Миллионы людей пользуются общественным транспортом, на месторождениях используется большое количество тяжелой техники, железнодорожные пути проходят по северным территориям, поэтому проблема гарантированного запуска двигателя при отрицательных температурах представляет определенный интерес [4].

## II. Цели и задачи исследования

В рамках данной работы рассматриваются только вопросы, связанные с обеспечением необходимой электрической мощности для прокрутки вала, в то время как существуют и другие проблемы, связанные, например, с сохранением ресурса двигателя во время запуска при пониженных температурах [5]. Для решения проблемы запуска в ситуации, когда отдаваемый ток аккумулятора резко снижается, предлагается использовать гибридный накопитель электрической энергии, который состоит из суперконденсаторной и аккумуляторной батарей, суперконденсаторная батарея обеспечивает большой пусковой ток, в то время как аккумуляторная бата-

рея заряжает суперконденсаторную между попытками запуска. Комплектация стартерной батареи одними суперконденсаторами невозможна в силу низкой удельной энергоемкости последних и высокой стоимости запасенной энергии, поскольку, кроме запуска двигателя, на нее также возлагается питание ряда бортовых потребителей транспортного средства. В то же время использование суперконденсаторов помогает сохранить ресурс аккумуляторов, которые склонны к деградации при высоких токах. Цель данной работы – оценить возможность запуска двигателя от разных типов накопителей, в том числе и с использованием возможностей гибридной схемы.

### **III. Физическое моделирование**

Различные схемы гибридных накопителей для транспортных средств представлены в [6]. Основными компонентами таких схем являются аккумуляторная и суперконденсаторная батареи, а также согласующие преобразователи. Наличие в схеме преобразователей позволяет более полно использовать возможности суперконденсаторов, так как минимизируется разница рабочих напряжений между батареями, что позволяет наиболее полно использовать энергию суперконденсаторной батареи, определяемую рабочим диапазоном напряжений. В то же время использование преобразователей увеличивает стоимость конечного изделия, а несовершенство преобразования энергии в них вносит свой вклад в ее потери. Надежность системы также снижается из-за возможности выхода из строя преобразователя. В данной работе рассматривалось прямое подключение аккумуляторной и суперконденсаторной батарей к шине постоянного тока параллельно друг другу. Блок-схема макета стартерного модуля приведена на рис. 1.

Для имитации нагрузочного режима использовался анализатор химических источников тока АСК150.24.1750.1 ООО «Яростанмаш», встроенный программатор которого позволяет задавать программы заряда-разряда химических источников тока [7]. В ряде опытов суперконденсаторная батарея была отключена для проверки возможностей аккумуляторной батареи по обеспечению запуска двигателя при пониженных температурах. Во время всех опытов аналогово-цифровыми преобразователями ОВЕН МВ110-224.2А регистрировались напряжения (через делители) и токи (через шунты) в цепях аккумуляторной и суперконденсаторной батарей и анализатора химических источников тока. Шаг записи данных модулем сбора данных ОВЕН МСД-200 – 1 с.

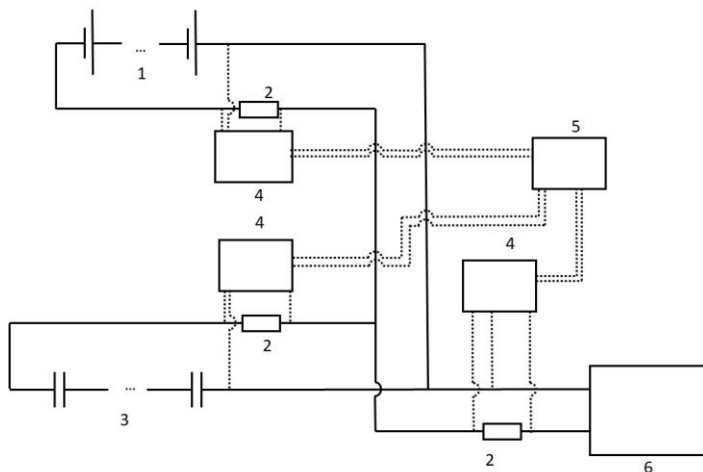


Рис. 1. Блок-схема макета гибридного накопителя электрической энергии для холодного запуска двигателя:

- 1 – аккумуляторная батарея; 2 – токовый шунт; 3 – суперконденсаторная батарея;  
 4 – аналогово-цифровой преобразователь; 5 – модуль регистрации данных;  
 6 – анализатор химических источников тока

Циклограммы реальных пусков показывают и более высокие значения пускового тока. Длительность таких воздействий составляет доли секунды, что не позволяет точно воспроизвести мощностную зависимость на имеющемся оборудовании. Стартерный ток не может быть достаточным условием для проворачивания вала двигателя при падении напряжения на источнике тока ниже определенного значения, обусловленного нижним пороговым напряжением стартера. Кроме того, снижение напряжения на аккумуляторной батарее до значений, определяемых типом аккумулятора, нежелательно по соображениям сохранения ее срока службы [8]. Для литий-ионных аккумуляторов это значение составляет 2,8 В/элемент (11,2 В для четырехэлементной батареи), свинцово-кислотные батареи большинства производителей не рекомендуются разряжать ниже 1,5 В/элемент (9 В для двенадцативольтовой батареи). Из-за широкого распространения именно свинцово-кислотных аккумуляторов и адаптации к ним напряжения бортовых сетей транспортных средств в данной серии экспериментов предельное нижнее значение напряжения было принято равным 9 В [9].

Несколько батарей из различных типов аккумуляторов были собраны для испытаний (табл. 1). Каждая батарея предварительно заряжалась током в 10% от номинальной емкости, выраженной в ампер-часах, примерно до 13 В, поскольку ситуация с полностью заряженными аккумуля-

торами при их фактическом использовании на транспортном средстве, реализуется крайне редко. После заряда каждая батарея выдерживалась в климатической камере КХТ-450М при  $t = -23^{\circ}\text{C}$  двое суток. В опытах по имитации запуска двигателя от гибридного накопителя параллельно аккумуляторной батарее подключалась суперконденсаторная батарея, заряженная до 16 В. Использовалось изделие производства ООО «ТЭЭМП» с рабочим напряжением 16,2 В и номинальной емкостью 225 Ф. Во всех экспериментах предпринимались три подачи нагрузки на накопитель без дополнительных подзарядок продолжительностью по 4 с, но с выдержкой в 10-20 с между подключением нагрузки для восстановления напряжения на аккумуляторной батарее.

Таблица 1.  
Параметры использованных аккумуляторных батарей

Батарея	Li-ion (LiNMC)	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-кислота
Расшифровка технологии	Литий-ионная (катодный материал – литированные смешанные оксиды)	Никель – металло-гидридая	Никель-кадмиевая	Свинцово-кислотная
Производитель	Sanyo	Camelion	Camelion	Delta Battery
Количество элементов в батарее, шт.	4	10	10	6 (поставляется собранной)
Номинальная емкость, А·ч	3,4	0,6	0,6	7,2
Номинальное напряжение, В	14,8	14	14	12
Рекомендуемое напряжение при заряде, В	16,8	15	15	14,6
Ток разряда в эксперименте, А	10,2	2	2	21

#### IV. Обсуждение результатов

Полученные в результате экспериментов зависимости напряжения от времени приведены на рис. 2 и 3. Ни одна из тестируемых аккумуляторных батарей не обеспечила устойчивой энергоотдачи в режиме имитации пуска двигателя сама по себе в заданных условиях из-за глубокой просадки напряжения. Наименьшее падение напряжения при этом показали свинцово-кислотные аккумуляторы. При параллельно присоединенной суперконденсаторной батарее, напротив, «пуск» обеспечивался при использовании любого из рассматриваемых типов аккумуляторов. При этом существенно повышалось (по сравнению с вариантом работы без супер-



конденсаторной батареи) напряжение на аккумуляторных батареях, что позволяет продлить их срок службы. Наихудшие результаты наблюдались для никель-металлогидридного аккумулятора. Падение напряжения на этой батарее было максимальным даже при работе в составе гибридного накопителя. При отсутствии преобразователей в электрической схеме возникает опасность бесконтрольного перераспределения энергетических потоков между аккумуляторной и суперконденсаторной батареями и разряда первой высокими токами. Поэтому были проанализированы потоки мощности и максимальные токи в ходе экспериментов с гибридной системой. Распределения мощности между источниками и нагрузкой для свинцово-кислотного аккумулятора с максимальными потоками мощности представлены на рис. 4, максимальные значения токов разряда аккумуляторной батареи (в относительных единицах  $C$ , являющихся отношением силы тока к емкости аккумулятора, выраженной в ампер-часах) – в табл. 2.

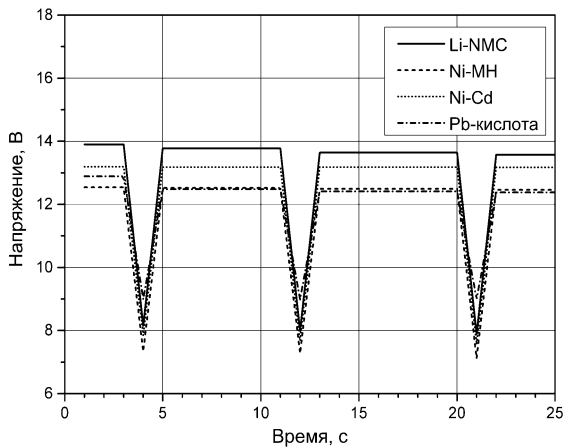


Рис. 2. Напряжение на аккумуляторных батареях во время имитации запуска двигателя без использования суперконденсаторной батареи

Определенное влияние на результаты эксперимента оказало то, что емкость суперконденсаторной батареи была одинаковой во всех опытах, а емкость аккумуляторных батарей и, соответственно, мощность нагрузки – разной. В случае никель-кадмиевой батареи разряд аккумуляторной батареи на суперконденсаторную начался в самом начале эксперимента в силу более высокого напряжения на данном типе аккумуляторов.

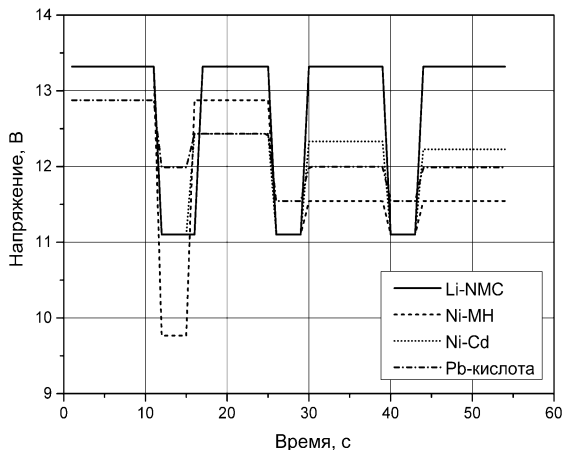


Рис. 3. Напряжение на аккумуляторных батареях во время имитации запуска двигателя с использованием суперконденсаторной батареи

При этом можно сказать, что никель-кадмиевая батарея на нагрузку практически не работала, а только компенсировала разряд и саморазряд суперконденсаторной батареи. В случае литий-ионной батареи имел место дозаряд суперконденсаторной батареи в самом начале эксперимента и некоторая реакция на нагрузку в его ходе. Для никель-металлогидридной батареи эта реакция практически незаметна, видимо из-за сильных просадок напряжения при низкой температуре — напряжение на суперконденсаторной батарее почти всегда оказывалось выше. Наконец, в случае свинцово-кислотной батареи, где абсолютные значения тока и мощности выше всего, наблюдалась постоянная подзарядка суперконденсаторной батареи от аккумуляторной. Вместе с тем, токи заряда аккумуляторной батареи от суперконденсаторной в отдельных случаях лишь незначительно превысили допустимые значения максимального тока разряда, рекомендованные производителями.

Таким образом, за счет более высокого напряжения разряда и меньших токов гибридный накопитель энергии позволяет продлить срок службы аккумуляторных батарей в режиме так называемого холодного пуска двигателя. В то же время различное поведение аккумуляторных батарей различной энергоемкости при одинаковой емкости суперконденсаторной батареи показывает, что для каждого типового значения тока разряда требуется оптимизация емкости суперконденсаторной батареи. Например, в случае никель-металлогидридной батареи подзаряд суперконденсаторной батареи почти не происходил, но все три попытки пуска были успешными.

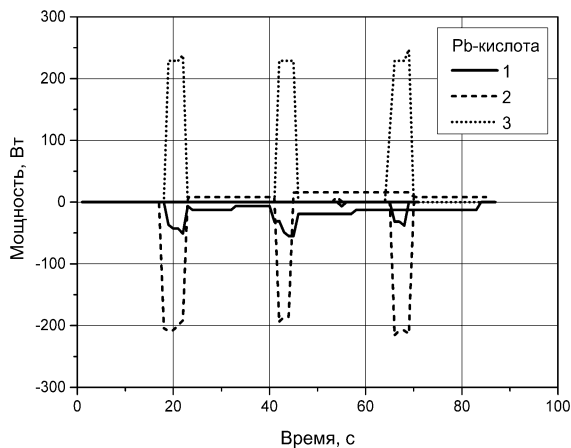


Рис. 4. Мощности в зависимости от времени в ходе экспериментов по имитации пуска двигателя от гибридного накопителя со свинцово-кислотным аккумулятором:  
 1 – мощность аккумуляторной батареи;  
 2 – мощность суперконденсаторной батареи; 3 – мощность нагрузки

Таблица 2.

Токи разряда аккумуляторных батарей в составе гибридного накопителя

Батарея	Li-ion (LiNMC)	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-кислота
Рекомендуемый максимальный кратковременный ток, относительные единицы $C$	2	0,5	2	3
Максимальный ток в ходе экспериментов, относительные единицы $C$	0,7	0,6	0,8	0,7

Это свидетельствует о «переразмеренной» суперконденсаторной батарее, что в реальных устройствах недопустимо в силу высокой стоимости и неудовлетворительных массогабаритных характеристик суперконденсаторов. Дальнейшее развитие данной работы должно быть связано с подбором оптимальной емкости суперконденсаторной батареи с учетом токов, емкости и экономических показателей, характерных для применения на конкретном транспортном средстве.

### V. Заключение

В рамках данной работы проведено физическое моделирование пуска двигателя транспортного средства от аккумуляторных батарей различ-

ных видов, а также гибридных накопителей, включающих в себя суперконденсаторную батарею, присоединенную параллельно аккумуляторной батарее. Опыты проводились с использованием климатической камеры, поддерживавшей  $t = -23^{\circ}\text{C}$  как в ходе эксперимента, так и предварительной выдержки в течение двух суток перед экспериментом для стабилизации температуры батарей. Показано, что использование гибридного накопителя с суперконденсаторами существенно повышает вероятность успешного запуска двигателя по сравнению с аккумуляторной батареей для всех рассмотренных типов аккумуляторов.

В режиме гибридного накопителя наилучшие показатели (с точки зрения наименьшей просадки напряжения в ходе имитации попыток запуска) показал никель-кадмиевый аккумулятор, наихудшие – никель – металлгидридный. Также показано, что в режиме гибридного накопителя для всех типов аккумуляторов достигаются относительно низкие токи нагрузки и относительно высокие напряжения разряда, что должно благоприятно сказаться на сроке службы аккумуляторных батарей.

Основным недостатком выполненной работы следует считать использование суперконденсаторной батареи фиксированной емкости, поэтому в развитии данного подхода необходимы расчетно-аналитические и экспериментальные исследования, направленные на оптимизацию емкости суперконденсатора (с учетом значительных массогабаритных характеристик и высокой удельной стоимости) для конкретных применений.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития».*

© Попель О.С., 2018  
© Тарасенко А.Б., 2018  
© Федотов А.А., 2018  
© Фрид С.Е., 2018

### Библиографический список

- [1] Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Тарасенко А.Б. Климатические аспекты создания фотоэлектрических светосигнальных устройств на возобновляемых источниках энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 10-11. С. 98-106.
- [2] Gelbke M., Mondoloni C. Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art, в Lead-Acid batteries for future automobiles. Elsevier, 2017. С. 149-184.

- [3] Попель О.С., Тарасенко А.Б. Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (Обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 27-44.
- [4] Beliakov A.I. Starting of locomotive diesel engines using electrochemical capacitors // Advanced Capacitor World Summit 2003. Washington, DC.
- [5] Jis B., Tian G., Feng H., Zuo Z., Roskilly A.P. An experimental investigation into the starting process of free-piston engine generator // Applied Energy. 2015. № 157. С. 798-804.
- [6] Song Z., Hofmann H., Li J., Han X., Zhang X., Ouyang M. A comparison study of different semiactive hybrid energy storage system topologies for electric vehicles // J. Power Sources. 2015. № 274. P. 400-411.
- [7] ООО «Яростанмаш». [Электронная ресурс] // Режим доступа: <http://www.yarst.org/>. (Дата обращения 12.04.2018).
- [8] Vutetakis D.G., Batteries, в The avionics handbook, C.R. Spitzer, Ch. 10. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [9] Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. № 3. С. 26-35.

**O.S. Popel<sup>1</sup>, A.B. Tarasenko<sup>1</sup>, A.A. Fedotov<sup>1,2</sup>, S.E. Frid<sup>1</sup>**

## **ELECTRIC ENERGY HYBRID STORAGE MODULE FOR ENGINE COLD CRANKING-PHYSICAL SIMULATION**

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Technology University «MPEI»,  
Moscow, Russia

**Abstract.** For many industrial facilities located in the northern regions of Russia, an important issue is the start of internal combustion engines that run on organic fuel. The article is devoted to the physical modeling of the electrical circuit of the starter when the engine is started at low ambient temperatures. Lead-acid, alkaline and lithium-ion batteries were used as test objects, as well as their combination with an organic electrolyte-based supercapacitor battery connected in parallel. The ratio of the starting current and energy intensity of the battery is selected in accordance with the typical operating conditions for starter batteries (the current is three times greater than the value of energy intensity of the battery, expressed in ampere-hour). Physical simulation of the launch was carried out using the climate chamber KHT 450M. In this case, discharge was performed by the indicated current of the battery or parallel connected to the battery and supercapacitor batteries for 4 s. Experimental data were obtained on the operation of various types of batteries in the starting mode at negative temperatures, including the characteristic values of currents and voltages for this mode, on the basis of which later on we can judge the degradation behavior of batteries. At a temperature of minus 23° C, none of the batteries provided a return of the required current for 3 s, since these attempts resulted in a voltage drop below 8-10 V (the lower limit of the allowable voltage was selected based

on the recommendations of battery manufacturers). When operating in parallel with a 225 F supercapacitor battery, the required current return was observed in experiments with all types of batteries. Thus, a super-capacitor battery significantly increases the likelihood of a successful engine start in adverse weather conditions. The smallest voltage drop was observed on a nickel-cadmium battery, the combination of which with supercapacitors can be considered the optimal solution for operating as a starter motor module at negative temperatures. However, the capacity of the super-capacitor battery requires further optimization.

**Keywords:** alkaline battery, engine cold cranking, hybrid drive, internal combustion engine, lithium-ion battery, lead acid battery, physical modeling, supercapacitor.

### References

- [1] O.S. Popel, S.E. Frid, Yu.G. Kolomietz and A.B. Tarasenko, «Climate aspects for renewable-based photoelectric light and signal units development», *Alternate Energy and Ecology*, no. 10-11, pp. 98-106, 2015.
- [2] M. Gelbke and C. Mondoloni, «Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art», in *Lead-Acid batteries for future automobiles*. Elsevier, 2017, pp. 149-184.
- [3] O.S. Popel and A.B. Tarasenko, «Hybrid Electric Energy Storages: Their Specific Features and Application (Review)», *Thermal Engineering*, vol. 65, no. 5, pp. 266-281, 2018.
- [4] A.I. Beliakov, «Starting of locomotive diesel engines using electrochemical capacitors» in *proc. Advanced Capacitor World Summit 2003*, Washington, DC, Aug. 11-13, 2003.
- [5] B. Jia, G. Tian, H. Feng, Z. Zuo and A.P. Roskilly, «An experimental investigation into the starting process of free-piston engine generator», *Applied Energy*, vol. 157, pp. 798-804, Nov. 2015.
- [6] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han, X. Zhang and M. Ouyang, «A comparison study of different semiactive hybrid energy storage system topologies for electric vehicles», *J. Power Sources*, vol. 274, pp. 400-411, 2015.
- [7] «Yarostanmash» LLC. [Online]. Available at: [http:// www.yarst.org/](http://www.yarst.org/). [Accessed: May 12, 2018].
- [8] D.G. Vutetakis, «Batteries», in *The avionics handbook*, C.R. Spitzer, ch. 10, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [9] O.S. Popel and A.B. Tarasenko, «Electric energy storage», *Energexpert*, no. 3, pp. 26-35, 2011.

УДК 658.26

Л.И. Коверникова<sup>1</sup>, В.Ч. Льюнг<sup>2</sup>, В.К. Нго<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ГАРМОНИК В УЗЛЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА К ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет

В связи с увеличением количества и мощности нелинейных нагрузок, для современных электротехнических комплексов актуальными являются вопросы снижения несинусоидальности токов и напряжений. Статья посвящена анализу гармоник активных мощностей, токов и напряжений в точке присоединения к питающей сети целлюлозно-бумажного комбината, представляющего мощную нелинейную нагрузку. Представлена характеристика целлюлозно-бумажного комбината, описан график нагрузки, построены графики фазных напряжений. Для режимов максимальных и минимальных нагрузок получены осциллограммы напряжений и токов. Установлено, что суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает нормативное значение только в одной фазе. Формы кривых фазных токов сильно искажены в ночное время. Фазовые углы гармоник напряжений и токов лежат в диапазоне от 0 до 360°, но по квадрантам комплексной плоскости распределены неравномерно. Форма распределения большинства гармоник напряжения и тока представляет собой смесь различных законов распределения. Выполнен анализ активных мощностей гармоник. Результаты показали, что наибольшие значения имеют активные мощности гармоник, соответствующие каноническим гармоникам нелинейного оборудования.

**Ключевые слова:** гармоники напряжения, гармоники тока, несимметрия, несинусоидальные режимы, фазовый угол.

### 1. Введение

Нелинейные нагрузки являются причиной несинусоидальных режимов в электрических сетях. Несинусоидальные токи и напряжения, содержащие синусоидальные составляющие частот, кратных основной частоте 50 Гц (гармоники), вызывают ущерб, как у потребителей электрической энергии, так и у энергоснабжающих организаций, что отражено в большом количестве публикаций. Например, в [1] речь идет о дополнительных потерях активной мощности на гармониках в электрических сетях и оборудовании. Активная энергия гармоник не выполняет полезной работы, поэтому происходит бесполезная трата электрической энергии, что противостоит

речит поставленной задаче энергосбережения [2]. В [3] ставятся вопросы финансовых потерь потребителей и энергоснабжающих организаций при оплате счетов за электрическую энергию, поскольку счетчики электрической энергии измеряют активную энергию не только первой гармоники, но и других, в том числе, активную энергию гармоник, источниками которых они не являются. Результаты измерений в сетях низкого и среднего напряжения представлены в хорошо известных публикациях [4-8]. Их авторы представляют результаты исследований режимов гармоник в сетях с различными типами нагрузок.

В последнее десятилетие продолжают интенсивные измерения параметров гармоник, что объясняется широким использованием нелинейного электронного оборудования и увеличением величин гармоник напряжений и токов в сетях. Например, авторы представляют: в [9] результаты измерений в узлах сети, питающей нагрузки ретрансляционной станции телевидения; в [10] результаты измерений параметров гармоник, которые генерируют энергосберегающие лампы; в [11] гармоники, измеренные в медицинском центре, и их влияние на медицинское оборудование; в [12] результаты масштабных измерений показателей качества электрической энергии в сетях 110 кВ Сибири, которая охватывает 23% территории России; в [13] результаты исследований измеренных параметров гармоник сложных нагрузок, присоединенных к узлам сетей 110-220 кВ; в [14] результаты анализа активных и реактивных мощностей гармоник нелинейных нагрузок, присоединенных к узлам сетей 110-220 кВ. Во многих случаях уровни гармоник напряжения превышают нормы, установленные в стандарте [15]. В [16] указывается, что 5,4% стоимости потерь из-за низкого качества электрической энергии приходится на потери, вызываемые гармониками тока и напряжения.

Хотя исследования параметров режимов гармоник в электрических сетях проводят много лет, интерес к этой проблеме не уменьшается из-за увеличивающегося количества нелинейных нагрузок в сетях различных напряжений и особенностей их режимов. Главная особенность состоит в вероятностном характере параметров режимов гармоник.

В данной статье представлены результаты анализа гармоник токов, напряжений и активных мощностей в узле присоединения к питающей сети 220 кВ мощной нелинейной нагрузки – целлюлозно-бумажного комбината. Измерения параметров режима были выполнены в фазах *A*, *B*, *C* сети в течение 24 час с интервалом времени 1 мин. После обработки измеренной информации получены ряды напряжений, токов и их фазовых углов для гармоник от 1 до 40, имеющие по 1440 элементов.

Гармоники токов, которые генерирует комбинат, текут в питающую сеть и становятся причиной искажения напряжений в узлах сети.



Комбинат расположен в регионе, в котором к сети 220 кВ присоединено большое количество других предприятий большой мощности, являющихся источниками гармоник – тяговые подстанции, алюминиевые заводы и т.д. Их гармоники токов также распространяются по сети 220 кВ и участвуют в формировании параметров режимов гармоник. Следовательно, напряжения в узлах электрической сети являются результатом влияния множества нелинейных нагрузок. В каждом узле сети несинусоидальное напряжение является уникальным, поскольку определяется гармониками токов, притекающих в узел от всех нелинейных нагрузок сети, и сопротивлением узла сети.

## II. Характеристика целлюлозно-бумажного комбината

Комбинат получает электрическую энергию из сети 220 кВ. На комбинате используются электродвигатели постоянного тока с системой автоматического регулирования скорости, которые приводят в действие основное технологическое оборудование. Мощности двигателей достигают 300 кВт. Для их питания постоянным током применяют тиристорные преобразователи, имеющие нелинейные вольт-амперные характеристики.

На рис. 1 представлены графики токов 1-ой гармоники нагрузки комбината для трех фаз. Предприятие имеет сменный график работы, поэтому режим максимальных нагрузок бывает в дневное время, а режим минимальных нагрузок в ночное, что хорошо видно из графиков.

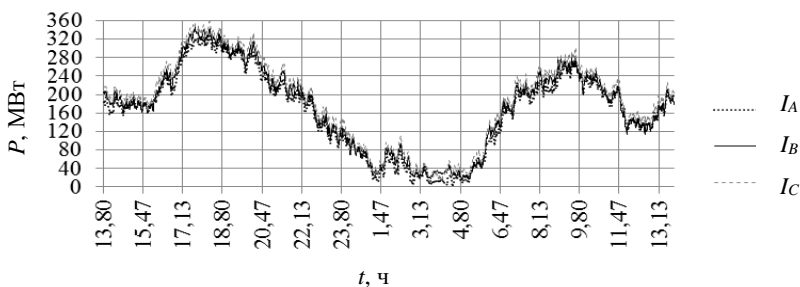


Рис. 1. Фазные токи в узле присоединения комбината

На рис. 2 приведены графики фазных напряжений в узле присоединения комбината к питающей сети. Величины напряжений находятся в допустимых пределах. Имеется несимметрия фазных напряжений.

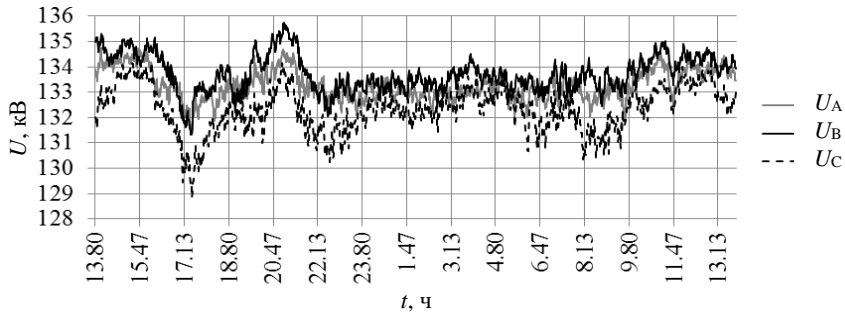


Рис. 2. Фазные напряжения в узле присоединения комбината

### III. Анализ напряжений в узле присоединения комбината к питающей сети

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений трех фаз в режимах максимальных и минимальных нагрузок. Формы кривых напряжений в обоих режимах незначительно отличаются от синусоидальных, что подтверждают величины суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения.

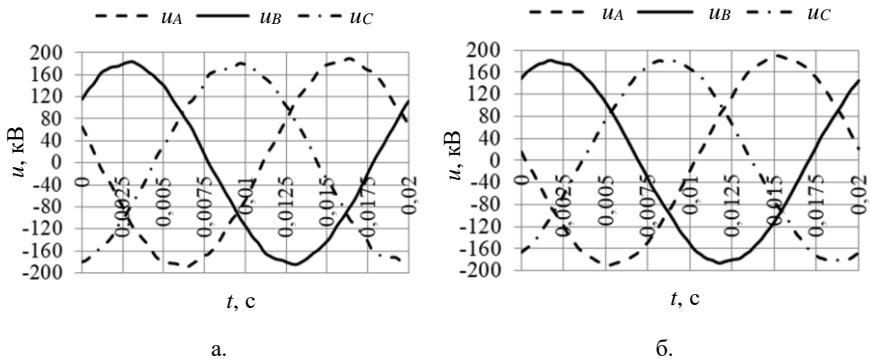


Рис. 3. Осциллограммы напряжений в режимах:  
а) максимальных; б) минимальных нагрузок

В режиме максимальных нагрузок в фазах *A*, *B* и *C* для 95% времени измерений они соответственно равны – 1,76%, 1,31%, 2,13%; в режиме минимальных нагрузок – 1,23%, 1,10%, 1,25%. Нормативное значение 2%, установленное в [15], превышено в фазе *C* в режиме максимальных нагрузок. Имеется также несимметрия фазных напряжений. Максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной

последовательности, зафиксированное за время измерений, оказалось равным равно 1,3% при норме 2% [15].

Анализ величин гармоник напряжений показал, что некоторые из них достигают больших значений. На рис. 4 представлена диаграмма действующих значений гармоник напряжений, имеющих наибольшие значения, в режимах максимальных ( $U_{\max}$ ) и минимальных ( $U_{\min}$ ) нагрузок.

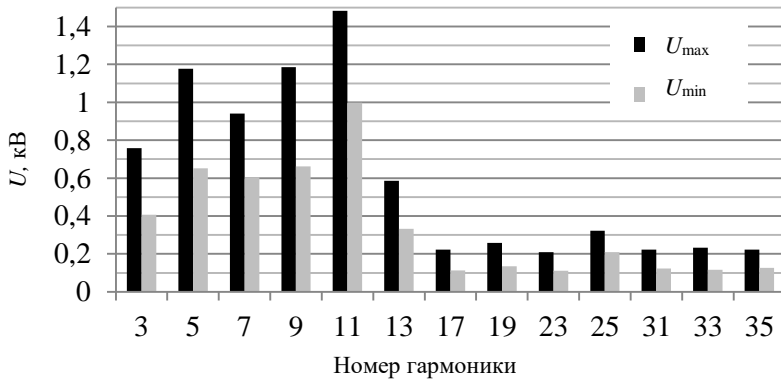


Рис. 4. Диаграмма величин гармоник напряжений

В процессе анализа измеренной информации выполнен анализ фазовых углов для десяти гармоник напряжения. Получено, что фазовые углы располагаются в диапазоне от 0 до 360°, но распределены неравномерно. Особенности распределения имеют фазовые углы 5 и 11-ой гармоник напряжения, приведенные на рис. 5. Подавляющее число фазовых углов 5-ой гармоники напряжения имеют величины от 90 до 270°.

При анализе рядов измеренных величин гармоник напряжений были вычислены статистические параметры [17]: максимальное значение (макс), минимальное значение (мин), математическое ожидание (сред), стандартное отклонение (ст. откл.) Результаты статистического анализа для десяти нечетных гармоник напряжения одной фазы, на которых чаще всего в узлах сети превышены нормы [15], приведены в табл. 1. Из приведенных данных видно, что величины гармоник напряжения изменяются в диапазоне от нескольких вольт до нескольких киловольт.

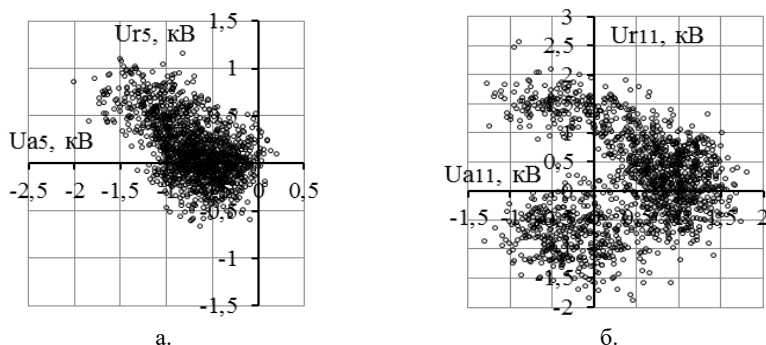


Рис. 5. Диаграммы фазовых углов гармоник напряжения:  
а) 5-ой; б) 11-ой

Таблица 1.  
Статистические оценки гармоник напряжения фазы А, кВ

Параметр	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
макс	1,18	2,18	1,61	1,94	2,73	1,08	0,45	0,48	0,50	0,57
мин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
сред	0,49	0,79	0,68	0,79	1,09	0,39	0,14	0,17	0,14	0,23
ст. откл	0,24	0,38	0,25	0,37	0,38	0,18	0,08	0,09	0,07	0,09

Для измеренных рядов величин десяти гармоник напряжения, приведенных в табл. 1, были построены гистограммы. Затем с помощью критерия Пирсона сделана их проверка на соответствие законам распределения Гаусса и Рэлея. Цель проверки состояла в том, чтобы подтвердить или опровергнуть утверждение авторов [7] о распределениях параметров режимов гармоник в большинстве случаев в соответствии с законами Гаусса или Рэлея. Проверка показала, что из десяти гармоник распределение Гаусса имеют 11-я и 25-я гармоники напряжения. Распределению Рэлея подчиняются измеренные напряжения 19-ой гармоники. Гистограммы остальных семи гармоник имеют формы, представляющие смеси известных распределений [17, 19, 20]. На рис. 6 приведены гистограммы и теоретические кривые распределений 11-ой гармоники напряжения по закону Гаусса и 19-ой по закону Рэлея.

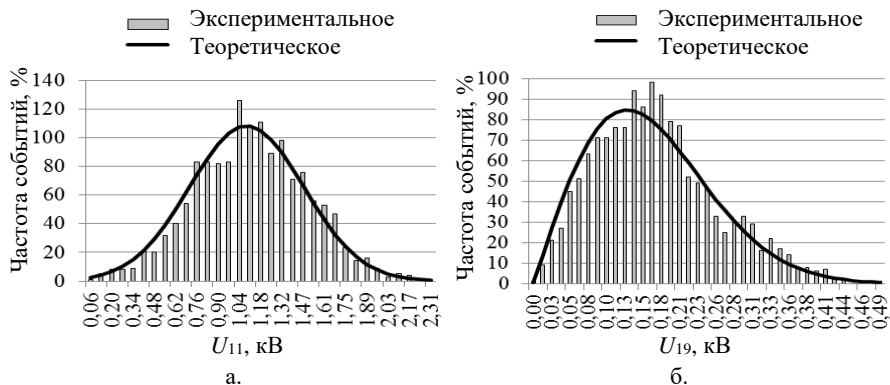


Рис. 6. Распределения величин гармоник напряжения:  
а) 11-ой по закону Гаусса; б) 19-ой по закону Рэля

#### IV. Анализ токов в узле присоединения комбината к питающей сети

На рис. 7 приведены осциллограммы токов для режимов максимальной и минимальной нагрузок предприятия. В минимальном режиме кривые токов очень сильно искажены.

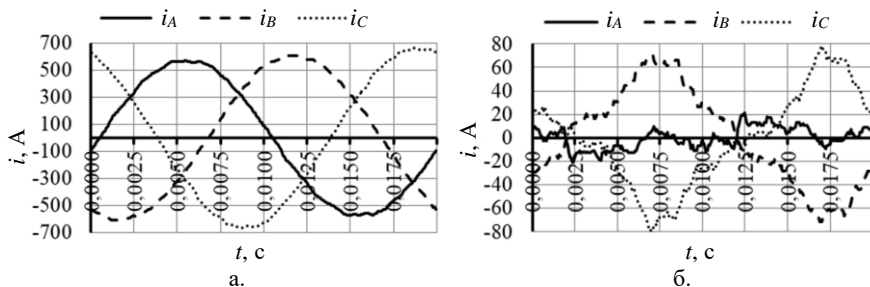


Рис. 7. Осциллограммы токов в режимах:  
а) максимальных; б) минимальных нагрузок

Изменения величин суммарного коэффициента гармонических составляющих тока:

$$K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} / I_1 \cdot 100\%, \quad (1)$$

приведены на рис. 8. Значения  $K_I$  при минимальных нагрузках в ночное время достигают нескольких сотен процентов. В дневное время в режиме

максимальных нагрузок, когда работает основное технологическое оборудование, величина  $K_I$  не превышает 6%.

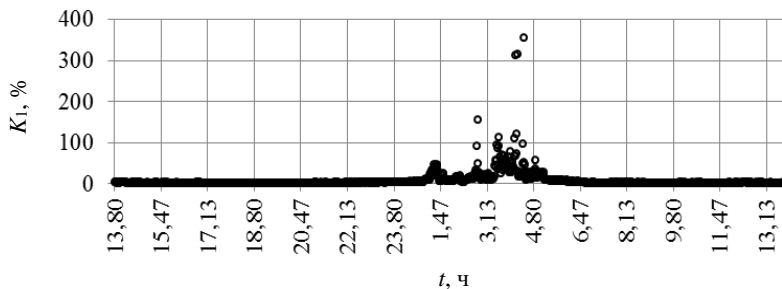


Рис. 8. Точечная диаграмма  $K_I$

На графике хорошо видна группа коэффициентов, значительно превышающая по величине остальные. Это так называемые выбросы или аномальные элементы [17, 18], которые нарушают стационарность рядов. Аномальные элементы не всегда и не везде можно определить визуально. Для их поиска в ряду измеренных параметров применяют специальные тесты и методы: метод Ирвина [21], тест фон Нейманна [22], критерий Дарлинга [23] и др. Проверка 3-ей гармоники тока с помощью метода Ирвина показала, что в массиве 3-ей гармоники тока имеется 4 элемента, а именно, 862, 865, 867 и 881, которые по величине значительно превышают остальные элементы. На рис. 9 приведен точечный график 3-ей гармоники тока, на котором видны аномальные элементы.

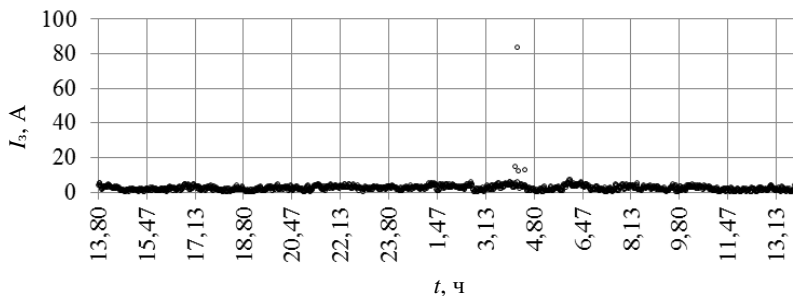


Рис. 9. Аномальные элементы 3-ей гармоники тока

На других гармониках также имеются аномальные величины токов. Анализ показал, что ток 1-ой гармоники с аномальными элементами имел величины менее 6,5 А. В момент времени,

соответствующий замеру 865, величина тока 1-ой гармоники составляла 5,2 А. Анормальные элементы искажают реальную картину режима, поэтому во многих случаях они должны быть исключены.

При анализе была выполнена статистическая оценка величин гармоник тока фазы А десяти нечетных гармоник, величины напряжений которых чаще всего превышают установленные в [15] нормы. Результаты вычислений приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что величины гармоник тока изменяются в широком диапазоне. Сравнение максимальных и минимальных значений и стандартных отклонений свидетельствует об их большом разбросе.

Таблица 2.  
Статистические оценки гармоник тока фазы А, А

Параметр	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
макс	15,12	3,11	4,65	1,94	6,01	4,37	2,34	1,75	2,14	4,68
мин	0,07	0,02	0,07	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01
сред	2,56	1,00	1,17	0,73	2,13	1,18	0,36	0,39	0,70	1,06
ст. откл.	2,51	0,78	0,95	0,43	1,17	0,67	0,27	0,35	0,40	0,63

Для анализа величин фазовых углов гармоник тока на комплексной плоскости были построены точечные диаграммы (рис. 10). Из анализа диаграмм можно сделать вывод, что фазовые узлы лежат в диапазоне от 0 до 360°, но распределены по квадрантам комплексной плоскости неравномерно, как, например, на диаграммах рис. 10, б и 10, в.

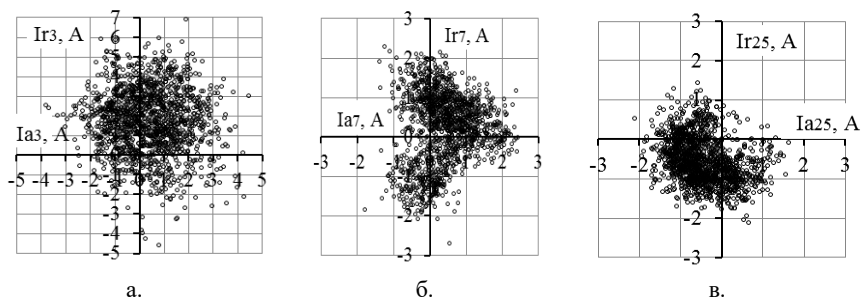


Рис. 10. Диаграммы фазовых углов гармоник токов:  
а) 3-ей; б) 7-ой; в) 25-ой

Активные и реактивные составляющие гармоник тока были вычислены по выражениям  $I_{an} = I_n \cdot \cos\varphi_n$ ,  $I_{rn} = I_n \cdot \sin\varphi_n$  для всех 1440 замеров. Затем были построены гистограммы распределения величин активных и реактивных составляющих гармоник токов и выполнена их проверка по критерию Пирсона на соответствие распределений законам Гаусса и Рэля. Оказалось, что активная составляющая 3-ей гармоники тока распределена по закону Гаусса (рис. 11, а), а для реактивной составляющей распределение закону Гаусса проверкой по критерию Пирсона не подтвердилось (рис. 11, б).

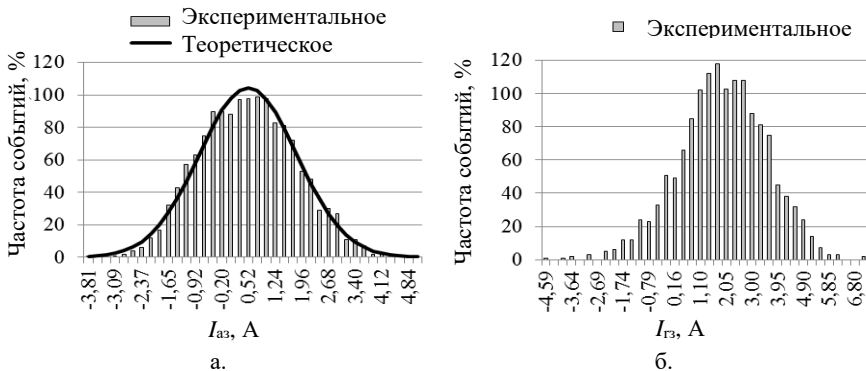


Рис. 11. Распределения величин 3-ей гармоники токов:  
а) активного; б) реактивного

В табл. 3 приведены результаты анализа законов распределения для десяти нечетных гармоник: модуля тока, активной и реактивной составляющих. В таблице обозначено: Г – закон распределения Гаусса, С – смесь нескольких законов распределения. Только на 7-й и 13-ой гармониках все три величины анализируемых токов распределены по закону Гаусса. На 5, 17 и 23-ей гармониках все три тока имеют смеси различных законов распределения. На 3, 9, 11, 19 и 25-ой гармониках одна или две из трех величин распределены по закону Гаусса, а остальные имеют смеси различных законов распределения.

Таблица 3.  
Законы распределения гармоник токов

$n$	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
$I_n$	С	С	Г	С	Г	Г	С	С	С	Г
$I_{an}$	Г	С	Г	Г	С	Г	С	Г	С	С
$I_{rn}$	С	С	Г	Г	С	Г	С	С	С	С



Для оценки влияния гармоник токов, протекающих через узел присоединения, на гармоники напряжения были вычислены коэффициенты линейной корреляции ( $r_{Un}, I_n$ ) для одной фазы [17]. Они приведены в табл. 4.

Таблица 4.  
Коэффициенты  $r_{Un}, I_n$  для фазы А

<i>n</i>	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
$r_{Un}, I_n$	0,29	0,34	- 0,07	0,51	0,43	0,43	0,16	0,22	0,55	0,31

Для оценки тесноты линейной связи между гармониками тока и напряжения использовалась шкала Чеддока [24]. В результате анализа установлены следующие степени силы корреляции: отсутствует ( $r_{Un}, I_{nc} = 0 - 0,1$ ) на 7-ой гармонике, слабая ( $r_{Un}, I_{nc} = 0,1 - 0,3$ ) на 3, 17 и 19-ой гармониках, умеренная ( $r_{Un}, I_{nc} = 0,3 - 0,5$ ) – на 5, 11, 13, 25 – ой гармониках. Сильной связи, соответствующей шкале Чеддока, не выявлено, поэтому можно сделать вывод, что в формирование гармоник напряжений в узле сети, к которой присоединен комбинат, большой вклад делают также нелинейные нагрузки, присоединенные к другим узлам этой же сети.

#### V. Анализ активных мощностей гармоник в узле присоединения комбината к питающей сети

Активные мощности на любой гармонике вычислялись как:

$$P_{nt} = U_{nt} \cdot I_{nt} \cdot \cos \varphi_{nt}, \quad (2)$$

где  $U_{nt}, I_{nt}$  – действующие значения напряжения и тока  $n$ -ой гармоники, измеренные на интервале 1 минута,  $t$  – номер интервала измерения,  $\varphi_{nt}$  – фазовый угол между векторами напряжения и тока  $n$ -ой гармоники на интервале измерения  $t$ , который вычисляется как  $\varphi_{nt} = \varphi_{U_{nt}} - \varphi_{I_{nt}}$ .

На рис. 12 приведен график активной мощности 1-ой гармоники. Максимальное значение мощности достигало 42.91 МВт, минимальное – 0,2 МВт. Величины углов  $\varphi_{nt}$  позволяют сделать вывод о направлениях потоков активных мощностей относительно узла, в котором произведены измерения. Если углы  $\varphi_{nt}$  лежат в диапазонах от 0 до  $\pi/2$  или от  $3\pi/2$  до  $2\pi$ , то активные мощности гармоник текут из сети в нагрузку, а узел для  $n$ -ой гармоники является нагрузочным. Если углы  $\varphi_{nt}$  лежат в диапазоне от  $\pi/2$  до  $3\pi/2$ , то активные мощности направлены из нагрузки в сеть, а узел для  $n$ -ой гармоники является генерирующим. Углы  $\varphi_{nt}$  чаще всего лежат в диапазоне от 0 до  $2\pi$ , но для некоторых гармоник они распределены на ком-

плексной плоскости очень неравномерно. На рис. 13 приведен пример диаграммы распределения углов  $\varphi_{n1}$  3-ей гармоники. Одну часть времени измерений активные мощности 3-ей гармоники текли из сети в нагрузку комбината, а другую часть времени из нагрузки комбината в сеть.

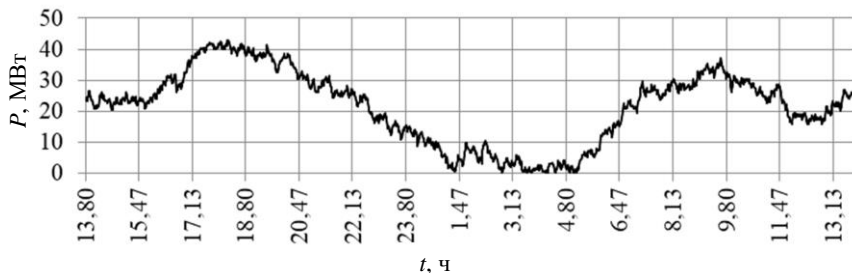


Рис. 12. График активной мощности 1-ой гармоники комбината

С помощью измеренных токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними были вычислены активные мощности гармоник от 2 до 40. Установлено, что направления потоков активных мощностей для всех гармоник в течение времени измерений изменяются. Но, для одних гармоник преобладающим, т.е. более 50% времени измерений, является направление из нагрузки в сеть, для других – из сети в нагрузку.

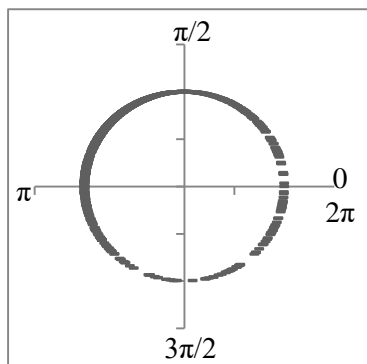


Рис. 13. Распределение углов  $\varphi_{n1}$  3-ей гармоники

На рис. 14 приведена диаграмма, показывающая количество времени протекания потоков активных мощностей гармоник через узел присоединения комбината к питающей сети из сети в нагрузку и наоборот. На диаграмме активные мощности гармоник со знаком «минус» ( $P_{n(-)}$ ) направ-

лены из нагрузки в сеть, а со знаком «плюс» ( $P_{n(+)}$ ) – из сети в нагрузку. Из диаграммы хорошо видно, что преобладают направления мощностей из сети в нагрузку.



Рис. 14. Диаграмма направлений активных мощностей гармоник

Величины активных мощностей четных гармоник в обоих направлениях очень малы и не превышают 0,1 кВт. Значительные потоки активных мощностей в обоих направлениях имеют место на некоторых нечетных гармониках. Статистические характеристики активных мощностей гармоник приведены в табл. 5. В узле присоединения комбината имеет большую величину активная мощность 3-ей гармоники, направленная в сеть. А из сети в нагрузку комбината течет большая по величине активная мощность 11-ой гармоники. Величины мощностей нечетных гармоник, которые не приведены в табл. 5, не превышают 0,2 кВт.

Таблица 5.  
Статистические оценки  $P_{n(-)}$  и  $P_{n(+)}$ , кВт

$n$	$P_{n(-)}$				$P_{n(+)}$			
	макс	мин	сред	ст.откл	макс	мин	сред	ст.откл
3	11,5	0,0	0,8	0,7	1,7	0,0	0,2	0,2
5	1,0	0,0	0,2	0,1	17,3	0,0	0,4	0,7
7	1,9	0,0	0,4	0,4	1,8	0,0	0,6	0,3
9	1,0	0,0	0,2	0,1	2,2	0,0	0,3	0,2
11	0,2	0,0	0,1	0,1	25,2	0,0	22,0	1,5
23	0,2	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,5	0,4

При питании от источника с синусоидальным напряжением в нагрузку комбината поступает поток активной мощности 1-ой гармоники  $P_{1(+)}$ . Большая часть этой мощности потребляется электрооборудованием для выполнения полезной работы  $P_W$ . Остальная преобразуется нелиней-

ным оборудованием в активные мощности гармоник порядков  $n > 1$ . Обозначим эти мощности как  $P_{n(-)}$ . Активная мощность 1-ой гармоники может быть представлена как:

$$P_{1(+)} = P_W + P_{n(-)}. \quad (3)$$

Вместе с активной мощностью 1-ой гармоники из сети в нагрузку комбината поступают активные мощности порядков  $n > 1 - P_{n(+)}$ , которые создаются нелинейными нагрузками, присоединенными к другим узлам питающей сети. Номера гармоник  $P_{n(-)}$  и  $P_{n(+)}$  могут быть разными. Таким образом, через узел присоединения комбината в нагрузку течет поток активных мощностей:

$$P = P_{1(+)} + P_{n(+)}. \quad (4)$$

Суммарная активная мощность гармоник порядков  $n > 1$ , т.е. вредная мощность, как она названа в [3], определяется как:

$$P_{dn} = P_{n(-)} + P_{n(+)}. \quad (5)$$

По полученному выражению были вычислены суммарные значения  $P_{dt}$  с учетом гармоник от 2 до 40 для всех 1440 замеров. В табл. 6 приведены статистические оценки  $P_{dt}$  в единицах измерения активной мощности и в процентах от полезной мощности  $P_{Wt}$ . Максимальные величины очень сильно отличаются от средних значений. Анализ массивов  $P_{dt}$ , состоящих из 1440 элементов, показал, что среди них имеется несколько аномальных элементов, которые по величине в разы превосходят остальные элементы массива. Они дают максимальные значения мощностей. Аномальные элементы не были исключены, так как учитываются счетчиками при измерении электрической энергии. Из приведенных данных также следует, что доля вредной активной мощности, протекающей через узел присоединения комбината к сети, не велика по сравнению с полезной активной мощностью. Вместе с тем, необходимо обратить внимание, что здесь представлены результаты расчетов только для 24 часов одной фазы электрической сети комбината.

Таблица 6.  
Статистические оценки  $P_{dt}$

Параметр	$P_{dt}$ , кВт	$P_{dt}$ , % $P_{Wt}$
макс	17,25	6,59
ст. откл	4,92	0,08

## VI. Выводы

1. Величины фазных напряжений в узле присоединения комбината в процессе измерений находились в допустимых пределах, имеют незначительные несимметрию и искажение форм кривой фазных напряжений. Суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает нормативное значение только в фазе С. Величины гармоник напряжения находятся в диапазоне от нескольких вольт до нескольких киловольт. Для большинства гармоник они имеют распределения, представляющие собой смеси различных законов распределения. Только напряжения 11 и 25-ой гармоник распределены по закону Гаусса, а 19-ой по закону Рэлея. Фазовые углы гармоник напряжений и токов лежат в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , но по квадратам комплексной плоскости распределены неравномерно.

2. Фазные токи, потребляемые нагрузкой целлюлозно-бумажного комбината, в течение суток изменяются. Они имеют наибольшие значения в дневные часы и наименьшие – в ночные, когда формы кривых фазных токов сильно искажены. Величины суммарного коэффициента гармоник фазных токов в период работы основного технологического оборудования не превышают 6%. В массивах гармоник токов имеются аномальные элементы, значительно превосходящие по величине остальные элементы. Фазовые углы гармоник токов лежат в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , но распределены не равномерно. Незначительное количество модулей действующих значений гармоник токов и их активных и реактивных составляющих распределены по закону Гаусса. Подавляющее большинство имеют форму распределения, представляющую собой смеси различных законов распределения.

3. Величины коэффициентов линейной корреляции между гармониками напряжений узла и токов нагрузки целлюлозно-бумажного комбината свидетельствуют о том, что на формирование гармоник напряжений оказывают влияние нелинейные нагрузки, присоединенные к другим узлам сети.

4. Активные мощности гармоник, протекающие через узел присоединения целлюлозно-бумажного комбината к питающей сети, в течение 24 часов времени измерений меняют направление протекания. Одну часть времени они направлены из нагрузки комбината в питающую сеть, а другую – из сети в нагрузку. Величины активных мощностей гармоник лежат в диапазоне от нескольких ватт до нескольких десятков киловатт. Наибольшие значения имеют активные мощности гармоник, являющиеся каноническими гармоникам нелинейного оборудования.

**Библиографический список**

- [1] Zhezhenlenko I.V., Sayenko Y.L. Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems // X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, June 15-18, 2010, Łagów, Poland. С. 98-105.
- [2] Федеральный закон Российской Федерации от 32.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
- [3] Czarnacki L.S. Working, reflected and detrimental active powers // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. № 1. С. 1-7.
- [4] Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. М.: Энергия, 1972.
- [5] Emanuel A.E., Orr J.A., Cyganski D., Gulachenski E.M. A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus // IEEE Trans. on Power Delivery. 1993. № 8 (1). С. 411-421.
- [6] Chung-Hsing H., Chi-Jui W., Shih-Shong Y., Yu-Wu C., Bor-An W., Jan-San H. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in Northern Taiwan // IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, № 12 (3), С. 1275-1284.
- [7] Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. Time-varying harmonics: Part I – Characterizing measured data // IEEE Trans. on Power Delivery. 1998. № 13 (3). С. 938-944.
- [8] Nejdawi I.M., Emanuel A.E., Pileggi D.J., Corridori M.J., Archambeault R.D. Harmonics trend in USA: a preliminary survey // IEEE Trans. on Power Delivery. 1999. № 14 (4). С. 1488-1494.
- [9] Vasconcellos A.B., T.I. R. de C. Malheiro, Castillo B.C., A.T. da Silva, Festa A.V., Gomes F.L. Analysis of power quality in a system of relay TV // Proceedings of the 14-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Sept. 26-29, 2010, Bergamo, Italy.
- [10] Фардиев И.Ш., Васильев Ю.А., Меер В.М. Энергосберегающие лампы и их влияние на электрическую сеть // Энергетика Татарстана. 2009. № 4 (16). С. 8-12.
- [11] Hartungi R., Jiang L. Investigation of power quality in health care facility // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2010. № 1 (8). С. 996-1004.
- [12] Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 228 с.
- [13] Kovernikova L.I. Results of the research into the harmonics of loads connected to the nodes of high – voltage network // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2014. № 12. С. 553-558.
- [14] Kovernikova L.I. Research into harmonic power in the high-voltage networks // Renewable Energy & Power Quality Journal. 2016. № 1 (14). С. 696-701.

- [15] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
- [16] Targosz R., Chapman D. Application Note. Cost of poor power Quality. 2012. [Электронный ресурс]. URL: [www.leonardo-energy.org/node/141781/](http://www.leonardo-energy.org/node/141781/) (дата обращения 01.05.2018).
- [17] Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.
- [18] Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. – 598 с.
- [19] Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности: Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
- [20] Королев В.Ю. EM – алгоритм, его модификации и их применение к задаче разделения смесей вероятностных распределений: Теоретический обзор. М.: ИРИ РАН, 2007. – 94 с.
- [21] Irwin J.O. On a criterion for the rejection of outlying observations // *Biometrika*, 1925. № 17 (3-4). С. 238-250.
- [22] Von Neumann J. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance // *Annals of mathematical statistics*. 1941. №. 13 (4). С. 367-395.
- [23] Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Новосибирск, 2011. – 888 с.
- [24] Сизова Т.М. Статистика: учебное пособие. С.-Пб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 176 с.

**L.I. Kovernikova<sup>1</sup>, Liong Van Ching<sup>2</sup>, Ngo Van Kyong<sup>2</sup>**

## **FEATURES OF HARMONIC MODE PARAMETERS IN CONNECTION POINT OF PULP AND PAPER MILL TO ELECTRICAL NETWORK**

<sup>1</sup> Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** In connection with the increase in the number and power of non-linear loads for modern electrical systems, the issues of reducing the non-sinusoidality of currents and voltages are relevant. The article is devoted to the analysis of the harmonics of active power, currents and voltages at the point of connection to the power supply network of a pulp and paper mill, which represents a powerful non-linear load. A characteristic of a pulp and paper mill is presented, a load graph is described, and phase voltage plots are given. Oscillograms of voltages and currents were obtained for the modes of maximum and minimum loads. It is established that the total voltage harmonic coeffi-

cient exceeds the standard value in only one phase. The shapes of the phase current curves are strongly distorted at night. The phase angles of the harmonics of voltages and currents are in the range from 0 to 360 °, but unevenly distributed across the quadrants of the complex plane. The distribution form of most voltage and current harmonics is a mixture of different distribution laws. The analysis of active power harmonics is performed. The results of the analysis showed that the highest values of active harmonic powers correspond to the canonical harmonics of nonlinear equipment.

**Keywords:** asymmetry, current harmonics, non-sinusoidal modes, phase angle, voltage harmonics.

### References

- [1] I.V. Zhezhelenko and Y.L. Sayenko, «Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems», in proc. X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, June 15-18, 2010, Łagów, Poland. P. 98-105.
- [2] Federal Law of the Russian Federation No. 261-FZ of November 32, 2009 «On Energy Saving and Improving Energy Efficiency and Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation».
- [3] L.S. Czarnecki, «Working, reflected and detrimental active powers», IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, pp. 1-7, 2012.
- [4] D.V. Timofeev, Modes in electrical systems with traction loads. Second edition, revised and updated. Moscow: Energy, 1972.
- [5] A.E. Emanuel, J.A. Orr, D. Cyganski and E.M. Gulachenski, «A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 411-421, Jan. 1993.
- [6] H. Chung-Hsing, W. Chi-Jui, Y. Shih-Shong, C. Yu-Wu, W. Bor-An and H. Jan-San, «Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in Northern Taiwan», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 3, pp. 1275-1284, July 1997.
- [7] «Probabilistic aspects task force of the Harmonics working group subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. Time – varying harmonics: Part I – Characterizing measured data», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 938-944, July 1998.
- [8] I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori and R.D. Archambeault, «Harmonics trend in USA: a preliminary survey», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1488-1494, Oct. 1999.
- [9] A.B. Vasconcellos, T.I. R. de C. Malheiro, B.C. Castillo, A.T. da Silva and A.V. Festa, F.L. Gomes, «Analysis of power quality in a system of relay TV», in proc. 14 – th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Sept. 26-29, 2010, Bergamo, Italy.
- [10] I.Sh. Fardiev, Yu.A. Vasiliev and V.M. Meer, «Energy saving lamps and their impact on power quality of the supply network», Power industry of Tatarstan, vol. 4, pp. 8-12, 2009.
- [11] R. Hartungi and L. Jiang, «Investigation of power quality in health care facility», Renewable Energy and Power Quality Journal, no. 12, pp. 553-558, Apr. 2014.
- [12] V.S. Borovikov, M.V. Volkov, V.V. Ivanov, V.V. Litvak, V.A. Melnikov, A.I. Pogonin and N.N. Kharlov, Experience in corporate survey of 110 kV electrical



- networks in Siberia, Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2010.
- [13] L.I. Kovernikova, «Results of the research into the harmonics of loads connected to the nodes of high – voltage network», *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 8, pp. 996-1004, Apr. 2010.
- [14] L.I. Kovernikova, «Research into harmonic power in the high-voltage networks», *Renewable Energy & Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 696-701, May 2016.
- [15] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160 – 2010 ed3.0, July 2010.
- [16] R. Targosz and D. Chapman, Application Note. Cost of poor power Quality. [Online]. Available at: [www.leonardo-energy.org/node/141781/](http://www.leonardo-energy.org/node/141781/) [Accessed: May 1, 2018].
- [17] A.I. Kobzar, *Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: FIZMATLIT, 2012.
- [18] L. Zaks, *Statistical Evaluation*. Moscow: Statistics, 1976.
- [19] S.A. Aivazyan, V.M. Buchstaber, I.S. Enyukov and L.D. Meshalkin, *Applied statistics: Classifications and reduction of dimension*. Moscow: Finance and Statistics, 1989.
- [20] V.Yu. Korolev, EM-algorithm, its modifications and their application to the problem of separation of mixtures of probability distributions: Theoretical review. Moscow: IRH RAS, 2007.
- [21] J.O. Irwin, «On a criterion for the rejection of outlying observations», *Biometrika*, vol. 17, no. 3-4, pp. 238-250, 1925.
- [22] J. Von Neumann, «Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance», *Annals of mathematical statistics*, vol. 13, pp. 367-395, 1941.
- [23] B.Yu. Lemeshko, S.B. Lemeshko, S.N. Postovalov and E.V. Chimitova, *Statistical analysis of data, modeling and investigation of probability laws. Computer approach*. Novosibirsk, 2011.
- [24] T.M. Sizov *Statistics: Tutorial*. St. Petersburg: ITMO University, 2013.

УДК 620.9

О.А. Иванин, Л.Б. Директор

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Для удаленных районов России актуальной задачей является гарантированное обеспечение потребителей электрической и тепловой энергией, что связано с развитием малой распределенной энергетики. При проектировании систем электроснабжения с источниками малой генерации важным является выбор наиболее эффективной схемы. В статье представлены результаты сравнительной оценки нескольких вариантов реализации системы энергоснабжения поселка Жиганск (Якутия). Рассмотрены схемы с использованием газотурбинной установки (ГТУ) и газового водогрейного котла. Проведен сравнительный анализ схемы с когенерационной надстройкой ГТУ со схемой без надстройки. При этом выполнено моделирование как автономной работы системы энергоснабжения, так и работы с подключением к внешней электрической сети. Для расчета режимных карт работы оборудования и определения затрат на энергоснабжение поселка использовался алгоритм оптимизации схем и режимов работы комплексов малой распределенной энергетики на базе симплекс-метода. Для четырех характерных дней года проведено моделирование графиков тепловых и электрических нагрузок. Прогнозирование электрических нагрузок осуществлялось с использованием алгоритма на основе технологии искусственной нейронной сети. Тепловые нагрузки моделировались с учетом климатических данных для поселка и типовых графиков нагрузок системы горячего водоснабжения. Показано, что при заданных условиях схемы с когенерацией экономически на 24-25% эффективнее, чем схемы без когенерации, и на 20-21% эффективнее, чем схемы с централизованным электроснабжением. Установлено, что наиболее эффективной является когенерационная схема с подключением к внешней электросети.

**Ключевые слова:** автономное энергоснабжение, газотурбинная установка, малая энергетика, мини-ТЭЦ, оптимизация, распределенная генерация, энергоэффективность.

### 1. Введение

В энергетической стратегии России развитие малой распределенной энергетики определено как одно из ключевых направлений [1]. До 2/3 территории страны, на которых проживает около 2 млн человек, не охвачены системами централизованного энергоснабжения [2]. При этом большая часть этих территорий расположена в районах за полярным кругом, а также в Сибири и на Дальнем Востоке – в зонах сурового климата с продол-

жительной зимой. Отсюда вытекает необходимость гарантированного обеспечения не только электрической, но и значительной тепловой нагрузки потребителей. Типичными потребителями являются объекты жилищно-коммунального сектора, спецификой которых является выраженная неравномерность суточных и сезонных графиков нагрузок. При проектировании или модернизации схем энергоснабжения таких объектов необходима оценка эффективности каждого из возможных вариантов схемных решений.

Методика таких оценок должна учитывать данные о нагрузках потребителя, климатические особенности региона, характеристики энергетических установок, которые могут входить в состав рассматриваемого энергокомплекса. Для этого необходимо моделировать работу энергетического комплекса в течение временного отрезка, соответствующего заданному горизонту расчета, который должен составлять не менее 1 года, поскольку такова периодичность повторения погодных условий и, как следствие, энергетических нагрузок.

Задача настоящей работы – сравнение эффективности схем энергоснабжения с раздельным и совместным производством тепловой и электрической энергии для конкретного потребителя – поселка, расположенного в Якутии. Применение методов математического моделирования и оптимизации с учетом всех вышеперечисленных исходных данных позволит определить эффективность когенерации в каждом конкретном случае, оценить сроки окупаемости оборудования, а также целесообразность введения дополнительных установок в состав энергетического комплекса.

## **II. Постановка задачи**

В качестве критерия эффективности выбрана величина совокупных затрат на энергоснабжение потребителя за расчетный период. При этом затраты разбиваются на постоянные, не зависящие от режима эксплуатации оборудования, и переменные, включающие затраты на топливо и покупку электроэнергии во внешней энергосети.

Объектом анализа является система энергоснабжения поселка Жиганск – административного центра Жиганского улуса Якутии. В качестве генерирующего оборудования выбрана газотурбинная установка ГТУ–2,5П производства ОДК «Пермские моторы». Характеристики ГТУ–2,5П представлены на официальном сайте производителя [3]. Номинальная электрическая мощность установки составляет 2,68 МВт, КПД в номинальном режиме – 21,1%, тепловая мощность когенерационной надстройки в номинальном режиме – 5,14 МВт.

Работа газотурбинной установки (ГТУ) моделировалась в режимах электрогенерации и когенерации, в обоих случаях рассматривались автономная работа системы энергоснабжения и работа в составе распределен-

тельной сети. Кроме того, для всех схем в состав оборудования входил пиковый водогрейный котел (ВК). Схема энергоснабжения п. Жиганск представлена на рис. 1.

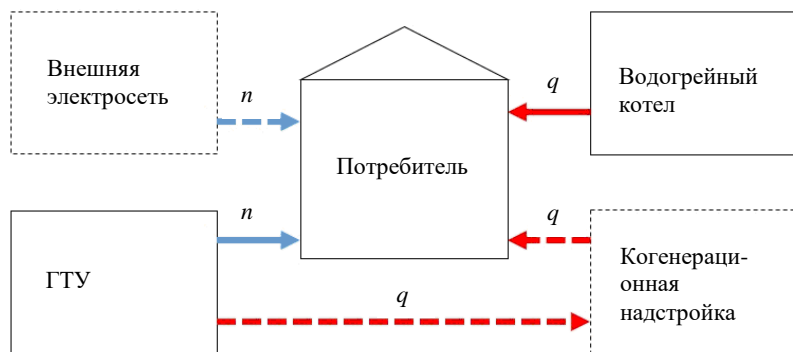


Рис. 1. Схема энергоснабжения поселка Жиганск:  
 $q$  – потоки тепловой энергии;  $n$  – потоки электрической энергии

### III. Методика расчета

Величина переменных затрат определялась по результатам моделирования работы системы энергоснабжения в течение года (горизонт расчета) с использованием методики оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов на базе симплекс-метода [4-6]. Графики нагрузок потребителя, построенные для горизонта расчета, разбивались на часовые интервалы, в пределах которых нагрузки, а, следовательно, и мощности генерирующих установок полагались постоянными. Для каждого временного интервала была составлена система линейных уравнений, включающая балансовые уравнения для тепловой и электрической энергии, а также ограничения на мгновенные значения вырабатываемой мощности для каждой установки. Общая система уравнений и ограничений дополнялась выражением для целевой функции. В качестве параметров оптимизации выбраны значения мощности установок для каждого временного интервала. Используемый в расчетах метод линейного программирования (симплекс-метод) позволяет за ограниченное число итераций определить набор значений параметров оптимизации, соответствующий минимальному значению целевой функции, в данном случае выражающей величину затрат на энергоснабжение п. Жиганск. Этот набор представляет собой оптимальную режимную карту работы энергетического оборудования.

### IV. Исходные данные

Поселок Жиганск – административный центр Жиганского улуса Якутии. Численность населения составляет 3451 человек, кроме того, по-

требителями энергии являются промышленные предприятия. В качестве характерных дней были выбраны 4 дня, для которых среднее значение температуры наружного воздуха наиболее близко к его средней температуре в соответствующем сезоне. Для моделирования графиков тепловой нагрузки использовались данные по суточным изменениям температуры [7], а также типовые графики горячего водоснабжения жилых зданий [8] и данные по нормативному потреблению горячей воды [9]. Относительные графики электрических нагрузок были сгенерированы методом краткосрочного моделирования электрических нагрузок обособленных населенных пунктов на базе аппарата искусственных нейронных сетей [10]. Характерные для 4 сезонов графики нагрузок, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 2.

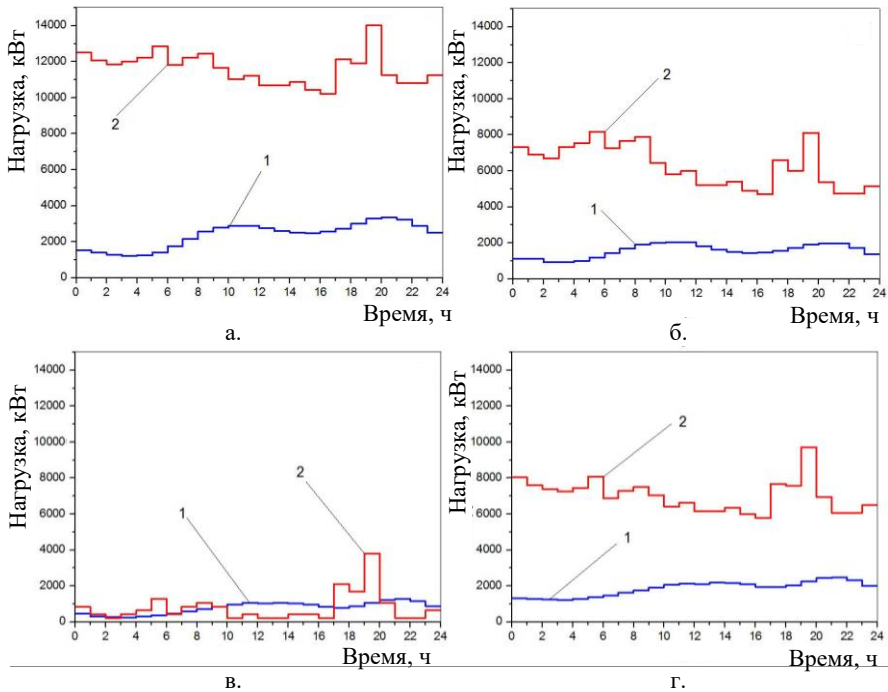


Рис. 2. Характерные графики нагрузок поселка Жиганск:  
а – зимний день; б – весенний день; в – летний день; г – осенний день;  
1 – электрическая нагрузка; 2 – тепловая нагрузка

Переменные затраты на энергоснабжение оценивались по затратам на топливо и покупку электроэнергии из внешней сети. Цена природного газа была принята равной 3,43 руб/м<sup>3</sup>. Предполагалось, что электроснабжение от внешней сети осуществляется по двухставочному тарифу: дневной – 2,42 руб/кВт·ч; ночной – 1,53 руб/кВт·ч. Постоянная составляющая затрат оценивалась как сумма капитальных затрат на оборудование и зарплату обслуживающего персонала. Затраты на ГТУ определялись как значение функции, аппроксимирующей зависимость удельной стоимости газотурбинных электростанций от их номинальной мощности, построенной для оборудования газотурбинных электростанций производства General electric мощностью до 50 МВт (рис. 3), и составили 634 \$/кВт или 103025 тысяч рублей. Назначенный ресурс работы установки составляет 120 000 часов (13,7 лет). Удельная стоимость ВК была выбрана равной 600 руб/кВт, исходя из предложений на отечественном рынке газовых ВК мощностью до 1 МВт. Удельная стоимость когенерационной надстройки принималась равной удельной стоимости газового котла, ресурс работы теплогенерирующего оборудования принимался равным 220 000 часов.

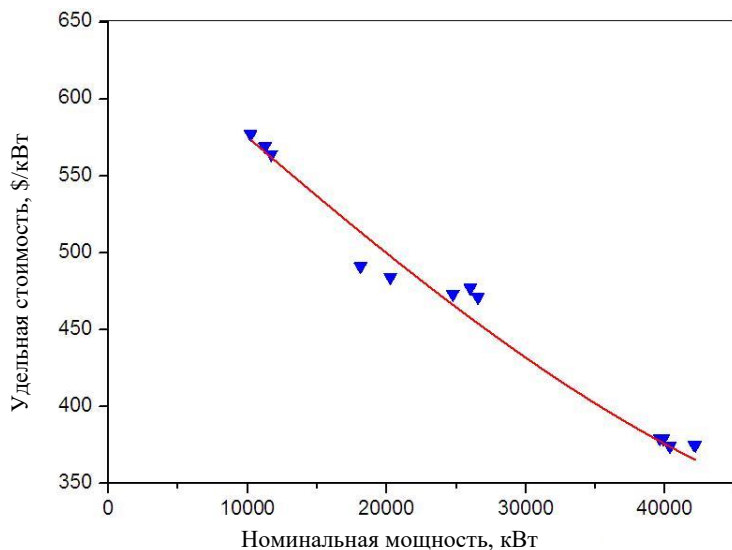


Рис. 3. Удельная стоимость газотурбинных электростанций производства General Electric в зависимости от их номинальной мощности:  
точки – удельные стоимости газотурбинных электростанций General Electric;  
кривая – аппроксимирующая зависимость

Численность персонала, занятого эксплуатацией энергетического оборудования, составляет 13 человек, что соответствует количеству персонала, обслуживающего энергетическую систему с аналогичным составом оборудования и схожей мощностью [11]. Среднемесячная заработная плата работников энергетической сферы согласно данным российского статистического ежегодника за 2017 год составила 39630 руб. [12]. Для сравнения рассчитаны затраты на энергоснабжение полностью от внешней электросети, а теплоснабжение – за счет газового ВК, номинальная мощность которого достаточно для покрытия пиковой тепловой нагрузки. При расчете затрат на выплату заработной платы работникам котельной число рабочих котельной принималось равным четырем.

Стоимость подключения к сети централизованного электроснабжения не учитывалась, поскольку затраты на такое подключение могут сильно варьироваться в зависимости от удаленности подключаемого потребителя от объектов сетевой инфраструктуры. Предполагалось, что потребитель подключен к электросети на момент принятия решения о сооружении электростанции.

### V. Результаты расчетов

Результаты расчета затрат на годовое энергоснабжение п. Жиганск представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Затраты на энергоснабжение п. Жиганск, тыс. руб.

Схема энерго-снабжения	Составляющая затрат	Период				
		Зима	Весна	Лето	Осень	Год
КГУ+ВК+ +электрическая сеть	Постоянная	3484	3484	3484	3484	13939
	Переменная	11420	6823	3884	7502	29631
	Сумма	14905	10308	7369	10987	<b>43570</b>
КГУ+ВК	Постоянная	3484	3484	3484	3484	13939
	Переменная	11420	6823	4465	7502	30211
	Сумма	14905	10308	7950	10987	<b>44150</b>
ГТУ+ВК+ +электрическая сеть	Постоянная	3489	3489	3489	3489	13958
	Переменная	16769	10233	4235	11837	43075
	Сумма	20258	13722	7725	15327	<b>57034</b>
ГТУ+ВК	Постоянная	3489	3489	3489	3489	13958
	Переменная	16769	11107	5079	12271	45227
	Сумма	20258	14596	8569	15760	<b>59185</b>
Электрическая сеть +ВК	Постоянная	475	475	475	475	1902
	Переменная	21345	12858	4547	14869	53621
	Сумма	21821	13334	5022	15344	<b>55523</b>

Анализ результатов показывает, что и в автономном режиме эксплуатации энергокомплекса, и при возможности импорта электроэнергии из внешней сети минимальные затраты соответствуют схеме с когенерацией (КГУ). При отсутствии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии совокупные затраты на энергоснабжение превышают затраты в базовом варианте. Режимные карты работы оборудования для наиболее эффективной схемы энергоснабжения, включающей когенерационную надстройку и предусматривающую подключение к внешней электросети, приведены на рис. 4.

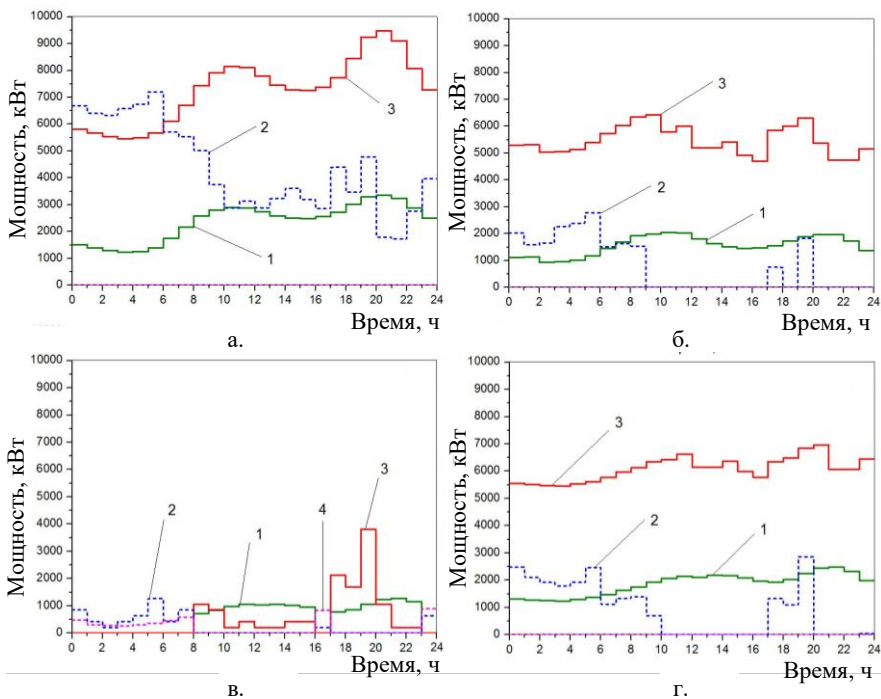


Рис. 4. Режимные карты работы системы энергоснабжения п. Жиганск.

Режимные карты соответствуют характерным суткам:

а – зимы; б – весны; в – лета; г – осени; 1 – КГУ (электроэнергия); 2 – ВК;

3 – КГУ (тепло); 4 – внешняя электрическая сеть

## VI. Заключение

Результаты расчетов демонстрируют значительное преимущество когенерационных схемы перед схемой с раздельным производством тепловой и электрической энергии: совокупные затраты на энергоснабжение



для когенерационных схем на 24-25% ниже. Использование когенерационной схемы эффективнее схемы с электроснабжением из внешней сети на 20-21%.

Независимость затрат на энергоснабжение для схем с когенерацией от доступа к внешней энергосети для зимы, весны и осени объясняется экономической нецелесообразностью покупки электроэнергии из сети, в том числе, по сниженному ночному тарифу. Однако в ряде случаев подключение к внешней электрической сети позволяет избежать эксплуатации ГТУ в режимах с низкой производительностью и очень низким электрическим КПД, соответствующим этим режимам.

© Иванин О.А., 2018  
© Директор Л.Б., 2018

### Библиографический список

- [1] Энергетическая стратегия развития России до 2035 года // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (дата обращения: 31.10.2018).
- [2] Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. М.: Интеллект, 2011. – 167 с.
- [3] ГТУ – 2,5П // Официальный сайт ОДК «Пермские моторы» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.pnz.ru/products/gtu\\_energy/gtu\\_2\\_5p/](http://www.pnz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/) (дата обращения 31.06.2018).
- [4] Майков И.Л., Директор Л.Б. Решение задач оптимизации и управления гибридными энергетическими комплексами в структуре распределенной генерации // Управление большими системами. 2011. № 35. С. 250-264.
- [5] Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л., Иванин О.А. Анализ схем энергетических комплексов малой распределенной энергетики // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 41-46.
- [6] Ivanin O.A., Director L.B. The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. vol. 774. no. 1. С. 1-8.
- [7] Архив погоды в Жиганске // Погода в 243 странах мира [Электронный ресурс]. URL: [https://gr5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Жиганске](https://gr5.ru/Архив_погоды_в_Жиганске) (дата обращения 31.06.2018).
- [8] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 1999. – 472 с.
- [9] Ведомственные нормы технологического проектирования: ВНТП–Н–97 – Нормы расходов воды потребителей систем сельскохозяйственного водоснабжения: нормативно – технический материал. М.: Союзводпроект, 1997.
- [10] Иванин О.А., Директор Л.Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. 2018. №5. С. 17-26.

- [11] Газотурбинная установка малой мощности // Материалы сайта АО СКБ «Турбина» [Электронный ресурс]. URL: <http://gasturbina.ru/malaya-gazoturbinnaya-ustanovka.pdf> (дата обращения 31.06.2018).
- [12] Российский статистический ежегодник 2017: статистический сборник, Суринова А.Е. М.: Росстат, 2017. – 688 с.

**O.A. Ivanin, L.B. Director**

**ASSESSMENT OF EFFICIENCY  
OF GAS-TURBINE-BASED ELECTRICAL SUPPLY  
SYSTEM FOR RURAL SETTLEMENT**

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

**Abstract.** The urgent task for remote regions of Russia is to ensure the supply of electricity and heat to consumers. The solution to this problem is associated with the development of a small distributed energy. It is important to choose the most efficient scheme when designing power supply systems with small generation sources. The article presents the results of a comparative assessment of several options for the implementation of the power supply system of the village Zhigansk (Yakutia). The schemes with the use of a gas turbine and a gas boiler are considered. A comparative analysis of the scheme with a cogeneration superstructure of a gas turbine unit with a scheme without a superstructure was carried out. The simulations of autonomous operation of the power supply system and work with connection to an external electrical network was performed. An algorithm to optimize the circuits and operating modes of small distributed power systems based on the simplex method was used to calculate the operating maps of the equipment and determine the cost of energy supply of the village. The modeling of heat and electric load graphs was performed for the four characteristic days of the year. Prediction of electrical loads was carried out using an algorithm based on artificial neural network technology. Heat loads were simulated taking into account climate data for the settlement and typical load schedules of the hot water supply system. It is shown that schemes with cogeneration are economically 24-25% more efficient than schemes without cogeneration, and 20-21% more efficient than schemes with centralized power supply. It has been established that the most efficient is cogeneration scheme with connection to an external power grid.

**Keywords:** autonomous energy supply, distributed generation, energy efficiency, gas-turbine unit, low power energetics, mini CHP, optimization.

**References**

- [1] Energy development strategy of Russia until 2035. [Online]. Available at: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf>. [Accessed: June 31, 2018].
- [2] V.E. Fortov and O.S. Popel, Energy in the modern world. Moscow: Intellekt, 2011.
- [3] GTU – 2,5P. «Permskiye Motori» official website. [Online]. Available at: [http://www.pmz.ru/products/gtu\\_energy/gtu\\_2\\_5p/](http://www.pmz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/). [Accessed: June 31, 2018].
- [4] I.L. Maikov and L.B. Direktor, «Solving optimization and control problems of hybrid power systems in structure of the distributed generation», Large-Scale Systems Control, vol. 35, pp. 250-264, 2011.
- [5] L.B. Direktor, V.M. Zaichenko, I.L. Maikov and O.A. Ivanin, «Analysis of power circuits of small distributed energy», Industrial Power Engineering, vol. 2, pp. 41-46, 2014.
- [6] O.A. Ivanin, L.B. Direktor, «The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods», J. Phys.: Conf. Ser. vol. 774, no. 1, pp. 1-8, 2016.
- [7] Archive of weather in Zhigansk. [Online]. Available at: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Жиганске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Жиганске). [Accessed: June 31, 2018].
- [8] E.Ya. Sokolov, Heat supply and networks. Moscow: MPEI, 1999.
- [9] Standards of water consumption of consumers of agricultural water supply systems: regulatory and technical material. Moscow: Soyuzvodproekt, 1997.
- [10] O.A. Ivanin and L.B. Direktor, «The use of artificial neural networks for forecasting the electric demand of stand – alone consumers», Thermal Engineering, vol. 65, no. 5, pp. 258-265, 2018.
- [11] Gas-turbine unit of low power. [Online]. Available at: <http://gasturbina.ru/malaya-gazoturbinaya-ustanovka.pdf>. [Accessed: June 31, 2018].
- [12] «Russian statistical yearbook 2017», in Statistical compilation, A.E. Surinov, Moscow: Rosstat, 2017.

УДК 620.91

А.М. Якупов

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ СЭС

Уфимский государственный авиационный технический университет

Для обеспечения надежной работы электротехнических комплексов в составе с солнечными электростанциями важным является разработка и исследование методик краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии. Статья посвящена исследованию методики, основанной на применении искусственной нейронной сети. В качестве объекта для проведения исследований выбрана Республика Башкортостан. Установлены недостатки методики, заключающиеся в неточном прогнозировании при изменении погодных условий в течение 24 часов. Это связано с тем, что для удаленных от экватора регионов необходимо учитывать характерные месяцы или использовать годовые часы. Также причиной снижения точности прогноза является использование излишне высокого порядка производной функции изменения солнечной радиации. Для устранения указанных проблем авторы использовали первую производную функции изменения солнечной радиации. Показано, что внесенные во входные данные искусственной нейронной сети изменения способствовали повышению точности прогнозирования. Установлено, что для большего увеличения точности прогнозирования требуется учет длительности погодных условий. Для этого предложено использовать метод исторического подобия, заключающийся в поиске исторически подобных интервалов, что выравнивает вероятность прогнозирования облачных и ясных дней.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, искусственные нейронные сети, метод исторического подобия, солнечная электростанция, солнечное излучение.

### 1. Введение

В настоящее время активно используются возобновляемые источники энергии, в том числе и солнечные электростанции (СЭС). Большинство СЭС работают в составе электрической сети и могут оказывать сильное влияние на сеть. В связи с этим, для точного управления сетью, содержащей СЭС, очень важно точное прогнозирование выработки электрической энергии СЭС. Существующие виды прогнозирования выработки электрической энергии СЭС можно разделить на две категории: статистические и физические. Физические модели основаны на математических уравнениях, описывающих физическое состояние, динамические изменения в атмосфере. Физические методы характеризуются сложными нелинейными уравнениями, решение которых требует больших вычислитель-

ных мощностей. К физическим методам можно отнести и численные методы прогнозирования [1-3]. Численные методы прогнозирования используют примерные решения уравнений, описывающих физические методы. Погрешности численных методов прогнозирования очень сильно варьируются и могут достигать больших значений, погрешности зависят от различных климатических факторов и динамического движения атмосферы в рассматриваемой области.

Статические модели включают в себя модели временных рядов [4], модели, основанные на данных со спутника [5, 6], модели, основанные на облачности [7], модели с искусственной нейронной сетью (ИНС) и основанные на вейвлет-анализе [8-10]. В работе [4] представлено сравнение статистических моделей, основанных на временных рядах, применяемых для прогнозирования полусуточных значений глобальной солнечной радиации диапазоном на 3 дня. В качестве входных данных используются данные за последние полдня. Набор данных наземной солнечной радиации используется станциями Испанской национальной метеорологической службы. Проверяются модели авторегрессивные, нейронные сети и модели нечеткой логики. Наилучший подход к прогнозированию полусуточных значений солнечной радиации – это модели нейронных сетей, за исключением станции Lerida, где модели, основанные на индексе четкости, имеют меньшую неопределенность, поскольку эта величина имеет линейное поведение и ее легче моделировать.

В работе [6] описывается применение статистического метода для обнаружения движения облачных структур из спутниковых изображений. Экстраполируя временное развитие облачной ситуации, солнечная радиация может быть предсказана для временных масштабов с 30 мин до 2 час. В работе представлен пример применения алгоритма прогнозирования выходной мощности солнечной панели. Ошибки спутниковых данных и прогнозы на основе изображений неба, предложенные в работах [5, 6] резко возрастают при низких углах восхода солнца, высоких пространственных вариациях и низких условиях солнечной радиации.

В работе [8] представлен практический метод прогнозирования солнечной радиации с использованием искусственной нейронной сети. Предложенная искусственная нейронная сеть, состоящая из многослойного перцептрона, позволяет прогнозировать солнечную радиацию на основе данных за 24 часа, используя настоящие значения средней дневной солнечной радиации и температуры воздуха. В качестве экспериментальной базы для данных применялась информация о солнечной радиации и данные о температуре воздуха (за период 01.07.2008 по 23.05.2009 и с 23.11.2009 по 24.01.2010). База данных была собрана в Триесте (широта 45°40'N, долгота 13°46'E). Результаты показывают, что предлагаемая мо-

дель хорошо работает, а коэффициент корреляции находится в диапазоне 98-99 % для солнечных дней и 94-96 % для пасмурных дней.

В работе [9], чтобы получить более высокую точность прогнозирования солнечной радиации, были объединены искусственная нейронная сеть и вейвлет-анализ. В статье последовательность данных солнечной радиации в качестве образцов отображается на несколько частотно-временных областей с использованием вейвлет-преобразования, и для каждой области устанавливается рекуррентная сеть обратного распространения. Прогнозируемое солнечное излучение равно алгебраической сумме компонентов, которые были предсказаны соответственно установленными сетями во всех частотно – временных областях. На основе исторических ежедневных отчетов о солнечной радиации в Шанхае представлен пример прогнозирования полной солнечной радиации.

## II. Цель работы

По результатам проведенного анализа работ видно, что существует большое количество методик для краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными панелями. Анализ показал, численные методы могут содержать значительную погрешность. Статистические модели, основывающиеся на авторегрессии и спутниковых данных, также обладают значительной погрешностью. Из проведенного обзора видно, что наиболее удобными и точными методами для прогнозирования являются методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей. Но по результатам работы [6] видно, что использование для краткосрочного прогнозирования только ИНС дает менее точные результаты, чем при использовании ИНС с вейвлет-преобразованием, но при применении вейвлет-преобразования сильно усложняется процесс прогнозирования. Поэтому актуальной научно – технической задачей является разработка методики краткосрочного прогнозирования солнечных панелей или улучшения существующих методик.

## III. Традиционная методика краткосрочного прогнозирования

В разработанных методиках краткосрочного прогнозирования с помощью ИНС традиционно используются следующие входные: средняя поверхностная солнечная радиация  $G_{SAVG}$ , производная 3 порядка функции солнечной радиации  $TOD_{max}$ , средняя квадратичная разница  $NDD$ , средняя температура за рассматриваемый период (24 часа)  $T_{AVR}$ , время  $n$ :

$$G_{ANN} = [G_{SAVG}, TOD_{max}, NDD, T_{AVR}, n]. \quad (1)$$

Но при использовании данной методики есть проблема прогнозирования при изменении погодных условий. Результаты апробирования показаны ниже. Для реализации методики использовался инструмент nntool

Matlab. В качестве алгоритма принимается алгоритм Левенберга-Марквардта, т.к. по проведенному обзору он показал лучшие результаты в других моделях.

#### IV. Исследование традиционной методики краткосрочного прогнозирования

Для выявления недостатков разработки ИНС по представленным входным данным и для улучшения методики прогнозирования, разработаны и опробованы ИНС, основывающиеся на современных исследованиях. В качестве исходных данных для обучения ИНС выбраны исторические измерения для любой точки уголка земли с интервалом измерений час. Для проверки берутся один облачный день и один ясный день.

Всего на вход ИНС подается матрица размером [8760 x 5] в качестве входного параметра, и матрица [8760 x 1] в качестве выходного параметра, фрагмент входных и выходных данных показан в табл. 1. Обучение ИНС состоит из трех этапов: обучение, проверка, тестирование. Принимается 70% данных для обучения, 15% – для проверки, 15% – для тестирования. Количество скрытых слоев принимается равным 30.

Таблица 1.  
Фрагмент подготовленных данных для ввода в ИНС

Входной параметр ИНС					Выходной параметр ИНС
$G_{AVG}$ , рад/м <sup>2</sup>	$TOD$	$NDD$	$T_{AVR}$ , С°	$n$ , час	$G_{out}$ , рад/м <sup>2</sup>
0	0	1,176807	17,0	1	0
0	0	1,176807	18,0	2	0
...	...	...	...	...	...

Прогнозирование ясного дня в ясный день не имеет смысла, т.к. результат будет точным. Поэтому для выявления недостатка ИНС, проводится проверка прогноза облачного дня в ясный день. Для этого подаются на вход данные за последние 24 часа, для прогнозирования облачного дня был выбран ясный день, причем входные данные брались из таблицы, использованной для обучения, то есть сходимость результата расчетного с поверяемым должна быть высокой. Результаты прогнозирования и поверяемая функция солнечной радиации представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, прогнозные данные на облачный день оказались недостаточно достоверными (максимальная абсолютная погрешность 1000 рад/м<sup>2</sup>), хотя ИНС обучилась с большой точностью и нехарактерной малой погрешностью. В связи с этим необходимо проанализировать и выяснить причины данных неточностей. Результаты обучения ИНС показан на рис. 1. Также необходимо проверить прогноз ясного дня в облачный день. Для этого на вход обученной ИНС подается данные облачного дня. Из рис. 2 видно, что

при прогнозировании графика поверхностной солнечной радиации, когда на вход ИНС подаются данные за предыдущие сутки облачного дня, ИНС выдает график с колебаниями, что не совсем соответствует действительности. Таким образом, представленная методика ввода и анализа данных не совсем точно позволяет прогнозировать при изменении климатических параметров. Анализируя недостатки данного метода, можно сделать вывод, что необходимо разработать методику прогнозирования, которая бы опиралась не только на измерения последних суток.

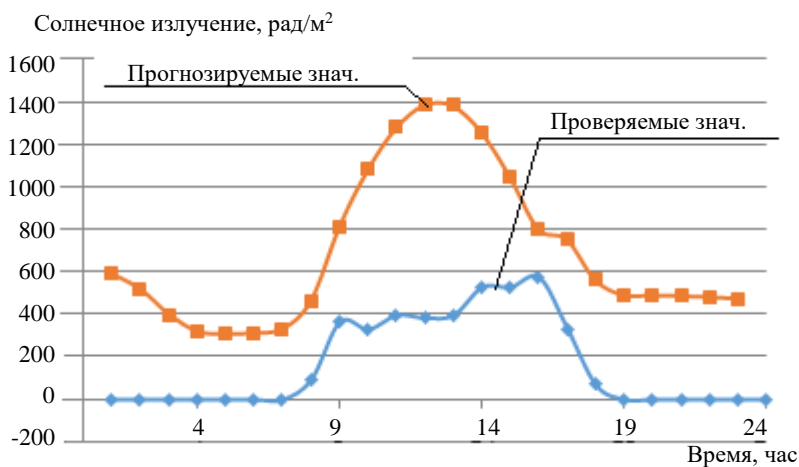


Рис. 1. Результат проверки ИНС на облачном дне

Отчасти такое неточное прогнозирование возникает, т.к. данные, которые подаются за нулевой момент времени, позволяют нейронной сети только сопоставлять с данными числом месяца, не учитывая месяц, к примеру, данная проблема очень актуальна для России, так как для России характерно изменение графика солнечной радиации на поверхности в разные месяцы, рис. 3. На рис. 3 видно, что средняя месячная солнечная радиация на поверхности на территории РБ имеет сильные перепады и варьируется в пределах от 0 до 600 рад/м<sup>2</sup>/день с 2000 – 2004.





Рис. 2. Результаты проверки на ясный день

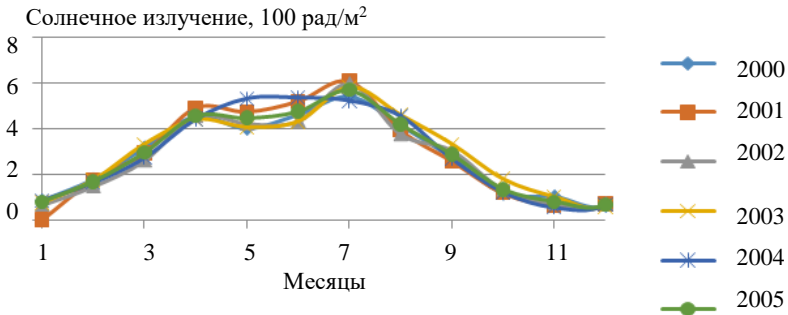


Рис. 3. Изменение графика функции солнечного излучения в течение года

Исходя из этого, делаем вывод, что для правильного обучения искусственной нейронной сети для стран, не находящихся на экваторе или близко к нему, с учетом того, что величина поверхностной солнечной радиации в зависимости от времени года изменяется из-за изменения светового дня, изменения угла падения солнечных лучей, а также перепадов температуры, необходимо обучать нейронную сеть в зависимости от месяца, либо принять в качестве параметра  $n$  годовой час ( $n = 1 - 8760$ ). Во втором случае точность будет выше, и выборка ИНС по параметру средней температуры  $T_{AVR}$ , нормированной поверхностной солнечной радиации,

нормированной внешней солнечной радиации за последние сутки будет более точной.

Несмотря на то, что представленные результаты прогнозирования для ясного дня во многих работах являются достаточно точным, они плохо работают при изменении климатических данных (к примеру, если в ясный день прогнозировать облачный или в облачный день прогнозировать ясный, результаты исследования показаны выше), поэтому необходимо обратить внимание на прогнозирование суммарной энергии на различных интервалах т.к. применение СЭС подразумевает применение АКБ или интегрирование в сеть, что позволяет нивелировать проблему непостоянства, поэтому решающее значение имеет количество средней энергии, выработанное за определенный интервал, это позволит абстрагироваться от проблемы случайных флуктуаций и заострить внимание на оценке необходимого запаса электрической энергии и снизит погрешность прогнозирования.

#### **V. Подбор и анализ входных данных ИНС**

Как было сказано выше, для точного прогнозирования необходимо либо обучаемые данные разделить по месяцам и характерным датам, либо ввести новый параметр годового дня, которой позволил бы ИНС учитывать угол наклона солнечных лучей (соответственно выработку СЭС) и максимально возможную солнечную радиацию за рассматриваемый период. В предыдущем разделе было озвучено, что необходимо использование годового часа для учета сезонного изменения поверхностного солнечного излучения. Для этого, вместо суточного часа введем годовой, исключим  $NDD$ , так как она не улучшает прогноз. Также в качестве производной принимаем производную первого порядка. Таким образом, в качестве входным параметров ИНС будут использоваться следующие параметры:

$$G_{ANN} = [G_{SAVG}, SOD, T_{AVR}, n], \quad (2)$$

где  $SOD$  – первая производная.

Результат применения входных показан на рис. 3.

#### **VI. Результаты и выводы**

Несмотря на переработку входных параметров ИНС и улучшения ее работы, ИНС не может точно прогнозировать при изменении климатических факторов, рис. 3. Результатом работы ИНС всегда получается прогноз ясного дня в определенные дни, это вызвано тем, что для обучения ИНС использовалось мало данных и то, что в ИНС не учитывается интервал времени, предшествовавшего моменту прогнозирования, тем самым, если в году наиболее вероятно солнечный день, то ИНС будет прогнозировать ясный день, хотя при длительном не изменении погодных условий, веро-

ятность изменения погодных условий увеличивается. Для учета интервалов времени и учета погодных условий, предшествовавших прогнозируемому дню, целесообразно использование метода исторического подобию.



Рис. 3. Результат проверки ИНС на облачном дне

© Якупов А.М., 2018

### Библиографический список

- [1] Hammer A., Heinemann D., Lorenz E., Lücke B. Short-term forecasting of solar radiation: A statistical approach using satellite data // *Solar Energy*. 1999. № 67 (1-3). С. 139-150.
- [2] Nova J.C., Cunha J.B., de Moura Oliveira P.B. Solar irradiation forecast model using time series analysis and sky images // *Proc. 5th conf. of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment*, July 25-28, 2005, Vila Real, Portugal.
- [3] Mellit A., Pavan A.M. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy // *Solar Energy*. 2010. № 84 (5). С. 807-821.
- [4] Cao J.C., Cao S.H. Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis // *Energy*. 2006. № 31 (15). С. 3435-3445.
- [5] Cao S., Cao J. Forecast of solar irradiance using recurrent neural networks combined with wavelet analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2005. № 25 (2-3). С. 161-172.
- [6] Kavasseri R.G., Seetharaman K. Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models // *Renewable Energy*. 2009. № 34 (5). С. 1388-1393.

- [7] Liu H., Tian H., Li Y. Comparison of two new ARIMA-ANN and ARIMA-Kalman hybrid methods for wind speed prediction // *Applied Energy*. 2012. № 98 (C). С. 415-424.
- [8] Filik T. Improved Spatio-temporal linear models for very short-term wind speed forecasting // *Energies*. 2016. № 9 (3). С. 168.
- [9] Zhang C., Wei H., Zhao X., Liu T., Zhang K. A Gaussian process regression based hybrid approach for short-term wind speed prediction // *Energy Conversion and Management*. 2016. № 126. С. 1084-1092.
- [10] Jiang P., Wang Z., Zhang K., Yang W. An innovative hybrid model based on data pre-processing and modified optimization algorithm and its application in wind speed forecasting // *Energies*. 2017. № 10 (7). С. 954.

**A.M. Yakupov**

## **METHOD OF SHORT-TERM FORECASTING OF SOLAR POWER PLANTS PRODUCTION**

Ufa State Aviation Technical University,  
Ufa, Russia

**Abstract.** In order to ensure the reliable operation of electrical complexes with solar power plants, it is important to develop and research short-term forecasting methods for generating electrical energy. The article is devoted to the study of methods based on the use of an artificial neural network. The relevance of the study is associated with the widespread use of such techniques. The Republic of Bashkortostan was chosen as the object of research. The drawbacks of the technique, consisting in inaccurate forecasting when changing weather conditions within 24 hours, are established. This is due to the fact that for regions remote from the equator, it is necessary to take into account characteristic months or to use annual hours. Also, the reason for the decrease in the accuracy of the forecast is the use of an unnecessarily high order of the derivative function of the change in solar radiation. To eliminate these problems, the authors used the first derivative of the function of change in solar radiation. It is shown that the changes made to the input data of the artificial neural network contributed to improving the prediction accuracy. It has been established that it is necessary to take into account the duration of weather conditions to increase the forecasting accuracy. The method of historical similarity, which consists in finding historically similar intervals, which evens out the probability of forecasting cloudy and clear days was proposed for this purpose.

**Keywords:** artificial neural networks, method of historical similarity, renewable energy sources, solar power station, solar radiation.

**References**

- [1] A. Hammer, D. Heinemann, E. Lorenz, and B. Lücke, «Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data», *Solar Energy*, vol. 67, no. 1-3, pp. 139-150, July 1999.
- [2] J.C. Nova, J.B. Cunha and P.B. de Moura Oliveira, «Solar irradiation forecast model using time series analysis and sky images», in *proc. 5th Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment*, July 25-28, 2005, Vila Real, Portugal.
- [3] A. Mellit and A.M. Pavan, «A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy», *Solar Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 807-821, May 2010.
- [4] J.C. Cao and S.H. Cao, «Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis», *Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 3435-3445, Dec. 2006.
- [5] S. Cao and J. Cao, «Forecast of solar irradiance using recurrent neural networks combined with wavelet analysis», *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 2-3, pp. 161-172, Feb. 2005.
- [6] R.G. Kavasseri and K. Seetharaman, «Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models», *Renewable Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1388-1393, May 2009.
- [7] H. Liu, H. Tian and Y. Li, «Comparison of two new ARIMA-ANN and ARIMA-Kalman hybrid methods for wind speed prediction», *Applied Energy*, vol. 98, no. C, pp. 415-424, 2012.
- [8] T. Filik, «Improved Spatio-temporal linear models for very short-term wind speed forecasting», *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 168, Mar. 2016.
- [9] C. Zhang, H. Wei, X. Zhao, T. Liu and K. Zhang, «A Gaussian process regression based hybrid approach for short-term wind speed prediction», *Energy Conversion and Management*, vol. 126, pp. 1084-1092, Oct. 2016.
- [10] P. Jiang, Z. Wang, K. Zhang and W. Yang, «An innovative hybrid model based on data pre – processing and modified optimization algorithm and its application in wind speed forecasting», *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 954, July 2017.

УДК 621.317.629.12

О.С. Хватов <sup>1</sup>, А.Б. Дарьенков <sup>2</sup>, Д.С. Кобяков <sup>1</sup>,  
Н.И. Кшталтный <sup>1</sup>, М.Е. Юрлов <sup>1</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта

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

Перспективный подход к повышению эффективности и маневренности судов связан с использованием судовой единой электростанции (СЭС). Однако серьезным недостатком является сложность включения генераторов на параллельную работу. В статье рассмотрена СЭС с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором (ДГ) переменной частоты вращения. Показано, что работа дизель-генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения двигателя внутреннего сгорания в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечивать энергоэффективный режим генерирования электроэнергии. Одним из способов повышения энергетических показателей СЭС заключается в переводе одного из параллельно работающих ДГ в режим переменной частоты вращения. При этом нагрузка между параллельно работающими ДГ распределяется пропорционально их частотам вращения независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей. Для стабилизации напряжения ДГ, работающего в режиме переменной частоты вращения, используется силовой полупроводниковый преобразователь. Представлены функциональная схема и математическая имитационная модель судовой единой электростанции. Приведены графики переходных процессов при изменении нагрузки в канале электродвижения судна.

**Ключевые слова:** генератор переменной частоты вращения, звено постоянного тока, математическая имитационная модель, переходные процессы, судовая единая электростанция, судовой электротехнический комплекс.

### 1. Введение

В настоящее время в судостроении всё больше внимания уделяется гребным электрическим установкам (ГЭУ), которые имеют ряд преимуществ перед установками с непосредственной передачей мощности от теп-

ловых двигателей на винт: повышенные манёвренные качества, надежность и живучесть судна, возможность отбора мощности от ГЭУ для вспомогательных нужд. В Волжском государственном университете водного транспорта разрабатывается концепция новых пассажирских судов с использованием ГЭУ с колесно-двигательным рулевым комплексом. Суда планируется использовать на реках, где в настоящее время судоходство ограничено небольшими глубинами, например, на Оке.

Опираясь на опыт эксплуатации судов проекта ПКС-40, одним из вариантов энергетической установки судна выбрано использование единой электростанции, содержащей два дизель-генератора (ДГ1, ДГ2) и являющейся общей как для питания гребной электрической установки, так и общесудовых потребителей. В качестве двигателей рассматриваются гребные колеса диаметром от 4,5-6 м, электродвигатели которых питаются от преобразователей частоты (ПЧ). Эксплуатация судов проекта ПКС-40 показала их высокую экономичность и маневренность. Однако были выявлены и существенные недостатки:

- неравномерное и быстроизменяющееся распределение мощности между гребными электродвигателями при активном маневрировании;
- сложность включения генераторов на параллельную работу и распределения между ними активной мощности, связанное с наличием высших гармонических в сети при работе преобразователей частоты.

Практика показывает, что один из ДГ может быть загружен на 150-170% от номинальной мощности, а другой существенно недогружен. Для преобразователей частоты и электрических двигателей данные перегрузки являются допустимыми. Однако перегрузка генераторов может составлять не более 110-115% от их номинальной мощности.

Решение данной проблемы заключается в реализации, так называемой, псевдопараллельной работы генераторов, когда преобразователи частоты каналов электродвижения соединены на стороне постоянного тока [1]. Научно обосновано и подтверждено экспериментально, что работа дизель-генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечивать энергоэффективный режим генерирования электроэнергии [2-5].

## **II. Постановка задачи**

Авторами с целью повышения энергетических показателей СЭС предложен вариант ее структуры, когда один из параллельно работающих ДГ переводится в режим переменной частоты вращения (рис. 1).

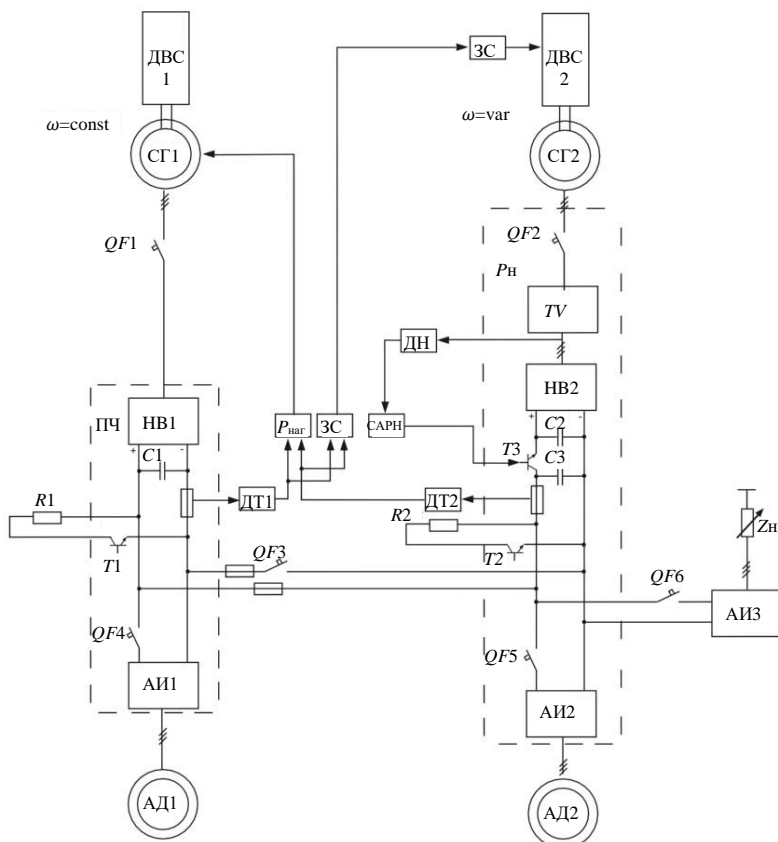


Рис. 1. Функциональная схема судовой единой электростанции с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором переменной частоты вращения:

АИ – автономный инвертор; ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
 ДТ – датчик тока; ЗС – задатчик скорости; НВ – выпрямитель;  
 ПЧ – преобразователь частоты; СГ – синхронный генератор; Т – транзистор;  
 ТН – трансформатор; QF – автоматический выключатель

Принцип работы схемы (рис. 1) заключается в принудительном регулировании частоты вращения ДВС2 при снижении нагрузки в канале электродвижения судна. Цель данного регулирования обусловлена поддержанием высоких энергетических показателей процесса генерирования электроэнергии за счет сохранения оптимального (близкого к номиналь-



ному) удельного расхода топлива ДВС. При этом нагрузка между параллельно работающими генераторами СГ1 и СГ2 будет распределяться пропорционально их частотам вращения и независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей АД1 и АД2. Для стабилизации напряжения ДГ2, работающего в режиме переменной частоты вращения, используется повышающий трансформатор  $TV$  и широтноимпульсный преобразователь, реализованный на транзисторе  $T3$ .

Преобразователи обоих ДГ соединены на стороне постоянного тока. Регулятор нагрузки  $P_{\text{наг}}$  воздействует на систему возбуждения СГ1, изменяя величину напряжения на его статоре.

### III. Методы и результаты исследования

Авторами разработана математическая имитационная модель данной системы (рис. 2).

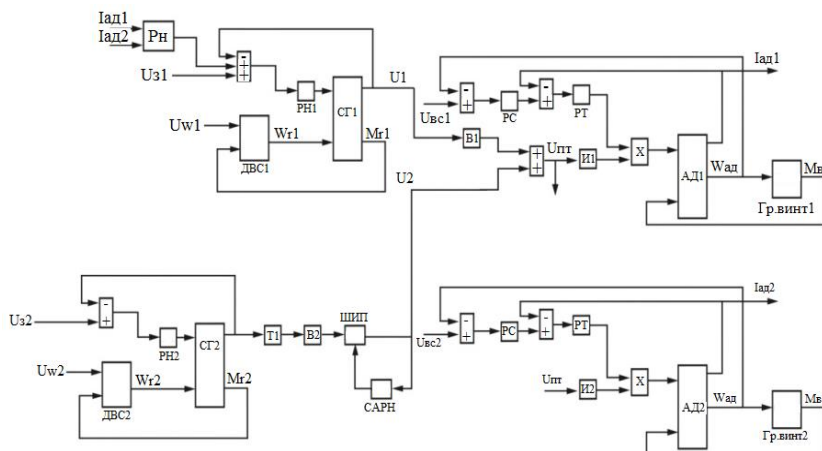


Рис. 2. Структурная схема математической модели единой судовой электростанции с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором переменной частоты вращения

Результаты имитационного моделирования динамических режимов при снижении нагрузки в канале электродвижения судна на 20% представлены на рис. 3-6. Зависимости частот вращения ДГ1 и ДГ2 изображены на рис. 3. При снижении на 20-й секунде нагрузки на гребные электродвигатели система регулирования снижает частоту вращения ДГ2 до 80% от номинальной, при этом регулятор нагрузки  $P_{\text{наг}}$  увеличивает напряжение на выходе СГ1, а распределение нагрузки между ДГ1 и ДГ2 происходит

пропорционально их частотам вращения и независимо от величин нагрузок на гребные электродвигатели. На рис. 4 представлены зависимости напряжений на выходе выпрямителя НВ1 ( $U_{НВ1}$ ) и ШИП-преобразователя ( $U_{ШИП}$ ). Зависимости изменения токовой загрузки генераторов СГ1 и СГ2 приведены на рис. 5.

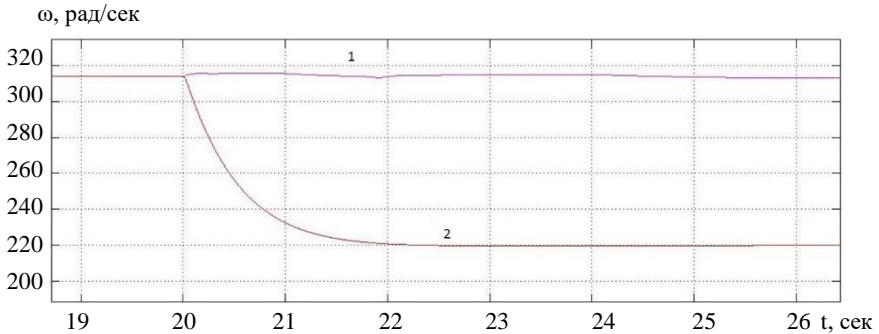


Рис. 3. Зависимости частоты вращения ДГ1 (1) и ДГ2 (2) при снижении нагрузки в канале электродвижения

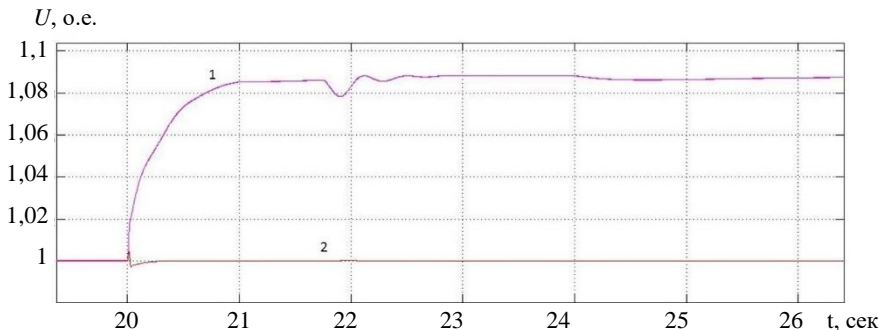


Рис. 4. Зависимости  $U_{НВ1}$  и  $U_{ШИП}$  при снижении нагрузки в канале электродвижения

Также для обеспечения стабильного выходного напряжения дизель-генераторной установки при прямом пуске асинхронного двигателя целесообразно использовать буферный накопитель энергии (БНЭ). В качестве накопителя может служить либо аккумуляторная батарея, либо суперконденсатор. Буферный накопитель подключается к звену постоянного тока ГЭУ.

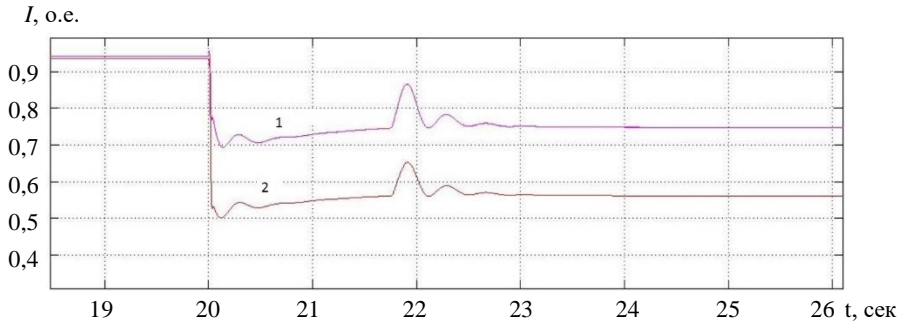
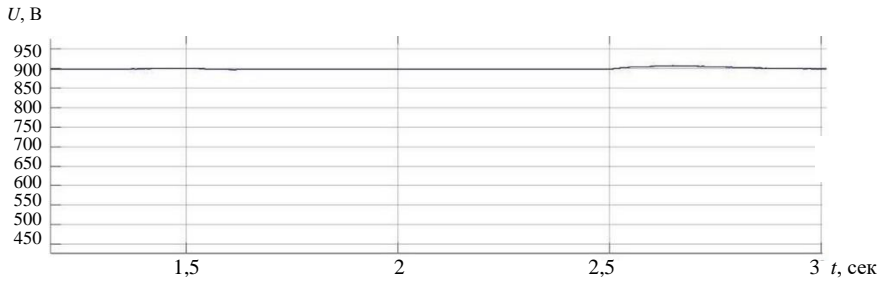
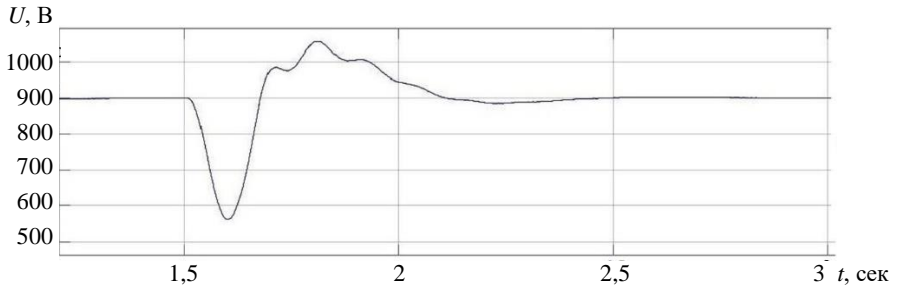


Рис. 5. Зависимости  $I_{CГ1}$  и  $I_{CГ2}$  при снижении нагрузки в канале электродвижения



а.



б.

Рис. 6. Графики напряжения звена постоянного тока ДГУ с переменной частотой вращения: с БНЭ (а); без БНЭ (б)

В данной работе рассматриваются переходные процессы при наличии и отсутствии БНЭ в составе ДГУ, работающей с переменной частотой вращения. На рис. 6 представлены осциллограммы имитационного моделирования напряжения звена постоянного тока ДГУ. Из рис. 6 видно, что БНЭ обеспечивает стабилизацию напряжения ДГУ при прямом пуске асинхронного электродвигателя.

#### **IV. Заключение**

Предложена структура системы параллельной работы дизель-генераторных агрегатов в составе электростанции судна с электродвижением. С целью повышения энергетических показателей СЭС показана целесообразность перевода одного из ДГ агрегатов в режим переменной частоты вращения. Разработана математическая имитационная модель динамических режимов параллельной работы ДГ агрегатов постоянной и переменной частоты вращения.

© Хватов О.С., 2018

© Дарьенков А.Б., 2018

© Кобяков Д.С., 2018

© Кшталтный Н.И., 2018

© Юрлов М.Е., 2018

#### **Библиографический список**

- [1] Бурда Е.М., Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кшталтный Н.И. Вариант единой электростанции колесного судна с электродвижением // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. 2016. № 2. С. 102-108.
- [2] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Дизель-генераторная электростанция переменной скорости вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
- [3] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // Электротехника. 2016. № 3. С. 35-40.
- [4] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Поляков И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения. Н. Новгород: НГТУ, 2016. – 172 с.
- [5] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С. Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 1 (71). С. 47-50.

O.S. Khvatov <sup>1</sup>, A.B. Dar'envkov <sup>2</sup>, D.S. Kobayakov <sup>1</sup>,  
N.I. Kshtaltny <sup>1</sup>, M.E. Yurlov <sup>1</sup>

**MODELING OF TRANSITIONAL PROCESSES  
DIESEL-GENERATOR INSTALLATIONS  
OF CONSTANT AND VARIABLE ROTATION  
FREQUENCY IN PARALLEL OPERATION**

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport  
Nizhny Novgorod, Russia

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

**Abstract.** A promising approach to improving the efficiency and maneuverability of ships is associated with the use of the ship's unified power plant (SPP). However, a serious drawback is the difficulty of switching on generators for parallel operation. The article considers the SUPP with a common DC link and a diesel-generator (DG) variable speed. It is shown that the operation of a DG set at a constant (nominal) rotational speed, but variable load is characterized by non-optimal (overestimated) specific fuel consumption. At the same time, the forced regulation of the rotational speed of the internal combustion engine in accordance with the magnitude of the electrical load of the generator allows for energy-efficient mode of generating electricity. One of the ways to increase the energy indicators of the SPP is to transfer one of the parallel operating DGs to the variable speed mode. In this case, the load between parallel DGs is distributed in proportion to their rotational speeds, regardless of the individual load of the propeller motors. To stabilize the voltage of a DG operating in the variable speed mode, a power semiconductor converter is used. The functional diagram and mathematical simulation model of the SPP are presented. The graphs of transients are shown when changing the load in the channel of the electric movement of the vessel.

**Keywords:** DC link, mathematical simulation model, ship electrical engineering complex, ship power station, transients, variable speed generator.

**References**

- [1] E.M. Burda, O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and N.I. Kshtaltny, «Type of the integral power station of wheeled vessel with electric propulsion», Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies, vol. 2, pp. 102-108, 2016.
- [2] O.S. Khvatov and A.B. Dar'envkov, «Power plant based on a variable-speed diesel generator», Russian Electrical Engineering, vol. 85, no. 3, pp. 145-149, 2014.

- [3] O.S. Khvatov and A.B. Dar'enkov, «A uniform power station of a transport unit with electric propulsion based on a diesel generator of varying rotation frequency», *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 3, pp. 150-155, 2016.
- [4] O.S. Khvatov, A.B. Dar'enkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Autonomous generator sets based on internal combustion engines of variable rotational speed*. N. Novgorod: NNSTU, 2016.
- [5] O.S. Khvatov, A.B. Dar'enkov and I.S. Samoyavchev, «The fuel profitability of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft», *Ekspluatacija Morskogo Transporta*, vol. 1, no. 71, pp. 47-50, 2012.

УДК 621.3.064

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ПИТАНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

<sup>1</sup> Московский государственный университет  
путей сообщения Императора Николая II

<sup>2</sup> Нижегородский государственный  
инженерно-экономический университет

Для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления современными электротехническими комплексами важной задачей является теоретическое обоснование основных положений и соотношений, не имеющих однозначного решения. Статья посвящена вопросам определения токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Информация о количественных соотношениях при возникновении короткого замыкания необходима для разработки систем быстрого обнаружения и ликвидации аварийного режима. Показано, что при составлении схем замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока, получающих питание по двум линиям от одной системы внешнего электроснабжения, необходимо учитывать взаимное сопротивление. Это позволяет оценить влияние тока короткого замыкания одной смежной подстанции на ток другой подстанции. Приведена система уравнений для определения параметров схемы замещения для расчета токов короткого замыкания в межподстанционной зоне по двум опытам короткого замыкания на шинах смежных подстанций. Представлена схема замещения, позволяющая по соотношению токов питающих линий смежных подстанций определить удаленность места повреждения от питающих подстанций.

**Ключевые слова:** межподстанционная зона, однолинейная схема замещения, релейная защита, соединение обмоток трансформатора, ток короткого замыкания, тяговая сеть переменного тока.

### 1. Введение

Эффективность систем электроснабжения потребителей электроэнергии в современных условиях можно повысить за счет широкого внедрения автоматизированных систем управления, основанных на цифровых информационных технологиях. Проблема интеллектуализации и внедрения оптимального управления в системе электроснабжения, включая цифровую защиту и автоматику, требует надежного теоретического обоснования основных положений, на которых строятся управляющие системы.

Следует признать, что в настоящее время еще многие из указанных вопросов не решены до конца.

В частности, среди специалистов до сих пор нет однозначного решения и теоретического обоснования выбора уставок релейной защиты на первичной и вторичной стороне трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/D-11. Нет обоснования правомочности преобразования схем соединения обмоток трансформатора из треугольника в звезду при несимметричной нагрузке или коротком замыкании.

Цель настоящей статьи – дать теоретическое обоснование основных соотношений, необходимых для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями и их защиты. Эти же теоретические обоснования могут лечь в основу информационных систем распознавания режима электрической сети и обнаружения предаварийного режима.

## II. Постановка проблемы

Схема соединений обмоток трансформаторов Y/D-11 применяется для питания участков железной дороги, электрифицированной на переменном токе напряжением 25 кВ [1-5]. От этих же трансформаторов может получать электрическую энергию и нетяговая нагрузка, в том числе расположенные рядом с железной дорогой ремонтные заводы, а также сельскохозяйственные потребители электроэнергии. Наиболее опасными для тяговых трансформаторов в эксплуатации являются аварийные режимы, вызванные короткими замыканиями (КЗ) [1, 3]. Чаще всего они происходят при замыкании контактного провода на рельс. Для разработки систем быстрого обнаружения и ликвидации КЗ необходимо исследовать количественные соотношения при возникающих аварийных режимах. Вначале обратимся к нормативным документам по указанным вопросам.

В руководящих указаниях по релейной защите [6, 7] систем тягового электроснабжения приведена расчетная схема питания тяговой сети на участке электрифицированной железной дороги переменного тока от двух смежных тяговых подстанций  $A$  и  $B$  при коротком замыкании в межподстанционной зоне (рис. 1), когда в результате повреждения контактная сеть соединяется с рельсовой сетью. По этой схеме рассчитывается ток короткого замыкания  $I_K$  и токи короткого замыкания питающих линий  $I_{KA}$  и  $I_{KB}$  подстанций  $A$  и  $B$ , по значению которых определяют уставки релейной защиты. По умолчанию предполагается, что силовые тяговые трансформаторы на тяговых подстанциях  $A$  и  $B$  получают питание от двух независимых, т.е. не связанных между собой систем внешнего электроснабжения с напряжениями  $U_{0A}$  и  $U_{0B}$  [6, 7]. В действительности же питание смежных тяговых подстанций может осуществляться на практике по раз-



личным схемам, но, как правило, по двум линиям электропередачи с двухсторонним питанием [1-3, 7-10].

### III. Определения параметров схемы замещения

В качестве примера рассмотрим теоретическое обоснование определения параметров элементов схемы замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, когда смежные тяговые подстанции получают питание от опорной тяговой или сетевой подстанции двумя линиями электропередачи с двухсторонним питанием (рис. 2).

В этом случае опорная подстанция и система внешнего электроснабжения эквивалентруется источником питания с напряжением  $U_0$ . В качестве тяговых трансформаторов используют трехобмоточные трехфазные трансформаторы 110/27,5 кВ с соединением тяговой обмотки в треугольник. Третья обмотка тягового трансформатора, используемая для питания нетяговых потребителей, на схеме не показана.

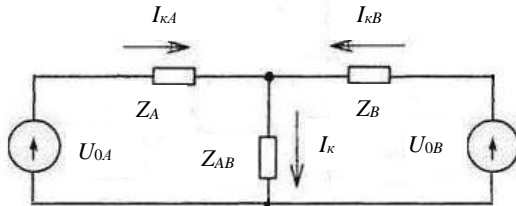


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети по нормативным документам

Сначала обоснуем возможность представить при двухфазном коротком замыкании трехфазную схему питания в виде однолинейной схемы, как это сделано на рис. 2. Особенностью представленной однолинейной схемы является то, что в последовательно включенных элементах одной и той же ветви действуют разные системы токов. В однофазных элементах токи текут по одному проводу, а в трехфазных элементах – по трем проводам. Возникает вопрос, можно ли на однолинейной схеме так включать указанные элементы. При обосновании не будем учитывать тяговые нагрузки в рассматриваемой межподстанционной зоне и смежных межподстанционных зонах, как это принято в нормативных документах. С учетом указанных допущений короткое замыкание в межподстанционной зоне следует рассматривать как двухфазное короткое замыкание тяговой сети при питании от смежных тяговых трансформаторов.

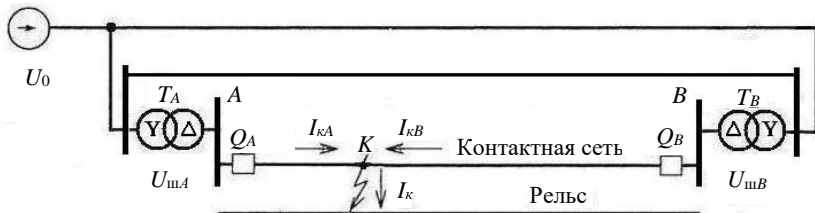


Рис. 2. Схема питания тяговой сети от одной системы внешнего электроснабжения с двухсторонним питанием

Рассмотрим сначала короткое замыкание в одном плече тяговой подстанции или в одной фидерной зоне, когда нагрузка в другом плече, как уже было указано выше, отсутствует.

При условии, что намагничивающие токи трансформатора равны нулю и в первичной и вторичной обмотках, соединенных по схеме Y/D отсутствуют токи нулевой последовательности, на каждом стержне магнитопровода трансформатора, т.е. в каждой фазе должно существовать равенство первичной и вторичной магнитодвижущей силы (МДС). Это значит, что для приведенного трансформатора должно существовать равенство первичных и вторичных токов в каждой фазе [4, 11, 12]. Другими словами, каждая фаза будет работать независимо. Действительно, как указано в [12], при наличии одной из обмоток, соединенной в треугольник, центр звезды фазных напряжений другой обмотки, соединенной в звезду, совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений. Токи нулевой последовательности в обмотку, соединенную треугольником, из других обмоток не трансформируются. Следовательно, сумма мгновенных токов в ней равна нулю и каждая фаза его работает независимо. Схема замещения тягового трансформатора и расчетные схемы при двухфазном коротком замыкании и одностороннем питании электрифицированного участка железной дороги приведены на рис. 3. Приведенные к напряжению тяговой сети фазные сопротивления  $Z_{ФС}$  питающей линии перенесены во вторичную обмотку тягового трансформатора и включены последовательно с фазным сопротивлением короткого замыкания трансформатора  $Z_{ФК}$ . Таким образом, в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора будет включено сопротивление:

$$Z_{ФКС} = Z_{ФК} + Z_{ФС}. \quad (1)$$

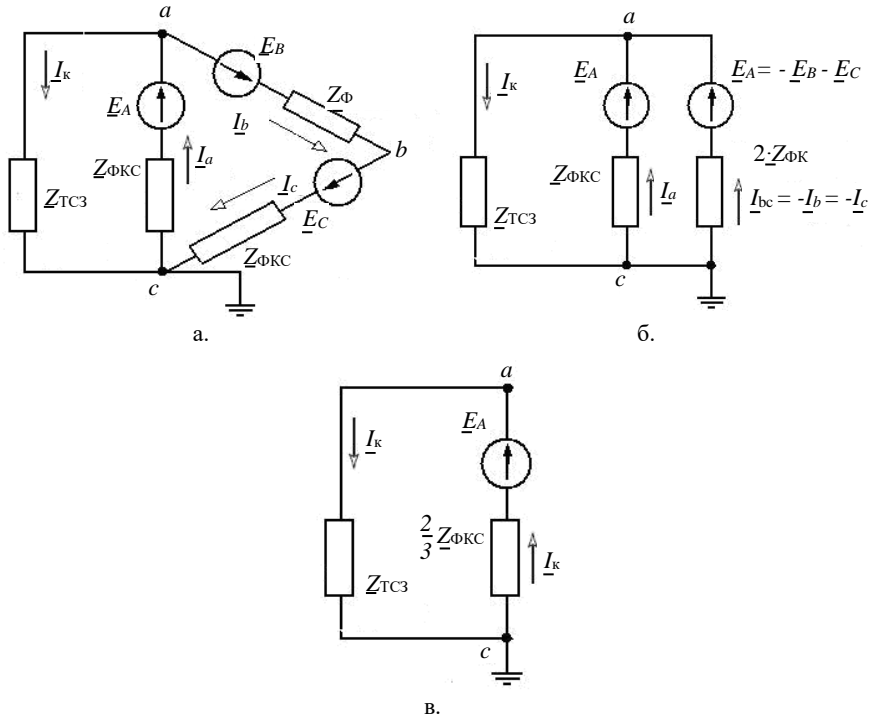


Рис. 3. Схема замещения тягового трансформатора при двухфазном коротком замыкании и одностороннем питании электрифицированного участка железной дороги (а), промежуточная (б) и окончательная (в) расчетные схемы

При двухфазном замыкании на выводах тяговой обмотки (рис. 3) одна фаза  $a$  обмотки оказывается соединенной параллельно с двумя соединенными последовательно фазами  $b$  и  $c$  этой же обмотки. В обеих ветвях действуют одинаковые по модулю и фазе источники ЭДС, поскольку  $E_A = -E_B - E_C$ . Но при этом сопротивления ветвей разные: сопротивление одной ветви (одной фазы трансформатора и одной фазы питающей линии) –  $Z_{ФКС}$ , а другой в два раза больше, т.е.  $2 \cdot Z_{ФКС}$ . Следовательно, при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником и двухфазном коротком замыкании ток в обмотке трансформатора протекает по двум параллельным ветвям: в «своей фазе»  $ax$  протекает фазный ток, равный  $I_k \cdot 2/3$ , а в двух других последовательно соединенных фазах  $by$  и  $cz$  – одинаковый ток  $I_k \cdot 1/3$ . Таким образом, эквивалентное внутреннее сопротивление  $Z_{П}$

тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании и соединении тяговой обмотки в треугольник согласно рис. 3 будет равно:

$$Z_{\Pi} = \frac{Z_{\text{ФКС}} \cdot 2 \cdot Z_{\text{ФКС}}}{Z_{\text{ФКС}} + 2 \cdot Z_{\text{ФКС}}} = \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{ФКС}} = \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{Ф}\Delta} . \quad (2)$$

Формулу (2) для внутреннего сопротивления  $Z_{\Pi}$  тяговой подстанции можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} Z_{\Pi} &= \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{Ф}\Delta} = \frac{2}{3} \cdot (Z_{\text{ФТ}\Delta} + Z_{\text{ФС}\Delta}) = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[ \frac{3 \cdot U_{\text{К}} \% \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{H}} \cdot n} + \frac{3 \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{С}}} \right] = 2 \cdot (Z_{\text{ФТГ}} + Z_{\text{ФСГ}}) . \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $Z_{\text{ФТГ}}$  и  $Z_{\text{ФСГ}}$  – расчетные фазные сопротивления обмотки трансформатора и питающей линии системы внешнего электроснабжения в предположении, что вторичная обмотка эквивалентного тягового трансформатора соединена звездой.

Умножение на коэффициент два фазного сопротивления при соединении вторичной обмотки звездой или умножение на  $2/3$  при соединении вторичной обмотки треугольником в формуле (3) есть не что иное, как переход к однофазной схеме. Умножение на коэффициент 2 в формуле (3) вместо коэффициента  $2/3$  означает, что по умолчанию схема соединения вторичной обмотки преобразуется из треугольника в звезду.

Поскольку во втором смежном трансформаторе будут точно такие же соотношения, то токи в каждой одноименной фазе и токи в однолинейной схеме можно для каждого узла складывать и вычитать в комплексной форме. Для однофазной и однолинейной схем будут выполняться законы Кирхгофа, что облегчает расчет и позволяет пользоваться однолинейной схемой замещения, показанной на рис. 4, а [9].

Если известны значения сопротивлений, указанных на схеме, то расчет токов КЗ производится по известным правилам. Если же точные значения сопротивлений не известны, то их можно определить из двух опытов короткого замыкания. В первом опыте измеряются токи  $I_{\text{кА}}$  (А) и  $I_{\text{кВ}}$  (А) питающих линий на подстанциях А и В при коротком замыкании на шинах подстанции А (рис. 5, а), а во втором опыте измеряют токи  $I_{\text{кА}}$  (В) и  $I_{\text{кВ}}$  (В) при замыкании на шинах подстанции В (рис. 5, б). Чтобы уменьшить число определяемых опытным путем параметров схемы, ее следует предварительно упростить: сначала в соответствии с рис. 4, б, преобразовав треугольник сопротивлений  $Z_{\text{П}\Delta}$ ,  $Z_{\text{ПВ}}$  и  $Z_{\text{П}\Delta\text{В}}$  в звезду сопротивлений  $Z_{\text{А}}$ ,

$Z_B$  и  $Z_C$ , а затем – в соответствии с рис. 4, в, сопротивления  $Z_0$ ,  $Z_C$  одним сопротивлением  $Z_1$ . Окончательные упрощенные схемы при поочередном коротком замыкании на шинах подстанции  $A$  и  $B$  приведена на рис. 5. На рис. 4 сопротивление  $Z_4 = Z_{TCA} + Z_{TCB}$  представляет собой сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны.

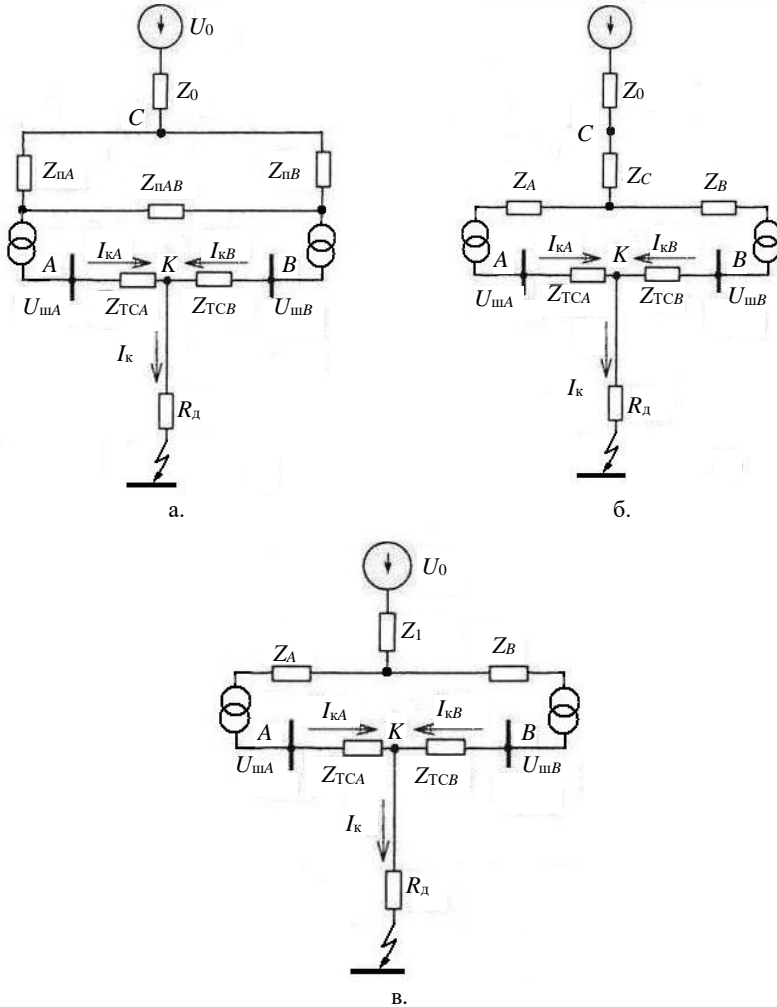
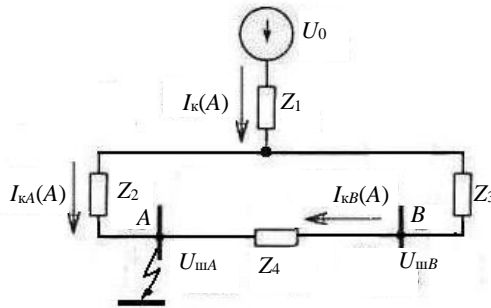


Рис. 4. Преобразование схемы питания при коротком замыкании в межподстанционной зоне

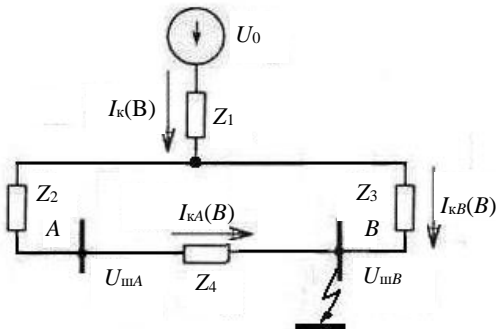
Для двух схем на рис. 5 составим следующую систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} I_{\kappa}(A) & I_{\kappa A}(A) & 0 & 0 \\ I_{\kappa}(A) & 0 & I_{\kappa B}(A) & I_{\kappa B}(A) \\ I_{\kappa}(B) & I_{\kappa A}(B) & 0 & I_{\kappa A}(B) \\ 0 & I_{\kappa A}(B) & -I_{\kappa B}(B) & I_{\kappa A}(B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_0 \\ U_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Решая уравнение (4), получим выражения для определения значений искомых сопротивлений. Зная их, можно рассчитать ток короткого замыкания в любой заданной точке схемы. Отметим, что по соотношению токов короткого замыкания  $I_{\kappa A}$  и  $I_{\kappa B}$  можно рассчитать и удаленность от подстанций  $A$  и  $B$  места произошедшего повреждения, что ускорит его обнаружение и ликвидацию.



а.



б.

Рис. 5. Упрощенные схемы при коротком замыкании на шинах подстанции  $A$  (а) и  $B$  (б)

Отметим следующие замечания по расчетам.

1. Приведенные расчеты взаимного сопротивления приведены для одной энергосистемы, питающие две смежные подстанции. Если же эти подстанции питаются от разных энергосистем, то расчеты токов КЗ следует выполнять отдельно для каждой энергосистемы.

2. Взаимное сопротивление можно определять на действующей подстанции и по методике [10].

#### IV. Выводы

1. При составлении схем замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока, получающих питание по двум линиям от одной системы внешнего электроснабжения, необходимо учитывать в этих схемах так называемое взаимное сопротивление, поскольку с его помощью можно учесть влияние тока короткого замыкания одной смежной подстанции на ток другой подстанции.

2. Расчет взаимного сопротивления по питающим линиям 110 (220) кВ позволяет уточнить расчеты релейной защиты тяговых сетей.

3. Представленная схема для расчета токов короткого замыкания в межподстанционной зоне тяговой сети позволяет по соотношению токов определить в этой зоне удаленность места повреждения от питающих подстанций, что ускоряет его обнаружение и сокращает перерыв в питании потребителей первой категории.

© Серебряков А.С., 2018

© Герман Л.А., 2018

© Осокин В.Л., 2018

#### Библиографический список

- [1] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 528 с.
- [2] Бей Ю.М. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
- [3] Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [4] Марквардт Г.Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе электроснабжения. М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
- [5] Косарев А.Б. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 329-334.
- [6] Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
- [7] СТО РЖД 07.021.4-2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».
- [8] Герман Л.А. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменных токов при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 3. С. 17-23.

- [9] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 16-21.
- [10] Герман Л.А. Способ определения узлового взаимного сопротивления в тяговой сети железных дорог. Пат. 23967077 РФ, опубл. 20.08.2001.
- [11] Серебряков А.С. Трансформаторы. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 360.
- [12] Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 – х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М.: Энергии, 1974. – 240 с.

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

**DETERMINATION OF EQUIVALENT CIRCUIT  
PARAMETERS FOR SHORT CURRENTS CALCULATION  
WITH TWO-WAY SUPPLY OF CONSUMERS**

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod branch of Moscow State University of Railway Engineering  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod Engineering-economic State University  
Knyaginino, Russia

**Abstract.** An important task for the information support of intelligent control systems of modern electrotechnical complexes is the theoretical substantiation of the main propositions and relations that do not have an unambiguous solution. The article is devoted to the issues of determining short circuit currents in the alternating current (AC) traction network. Information about the quantitative ratios in the event of a short circuit is necessary for the development of systems for rapid detection and elimination of emergency mode. It is shown that it is necessary to take into account the mutual resistance when drawing up equivalent circuits for calculating short circuit currents in AC traction networks that receive power from two lines from one external power supply system. This makes it possible to evaluate the influence of the short circuit current of one adjacent substation on the current of another substation. The system of equations for determining the parameters of the equivalent circuit for calculating short circuit currents in the inter-substation zone using two short circuit tests on buses of adjacent substations is presented. A replacement scheme is presented, which allows determining the distance of the damage site from the supplying substations by the ratio of the currents of the supply lines of adjacent substations.

**Keywords:** connection of transformer windings, interstation zone, relay protection, short circuit current, single-line equivalent circuit, traction network of alternating current.



**References**

- [1] K.G. Marquardt, Power supply of electrified railways. Moscow: Transport, 1983, P. 528.
- [2] Yu.M. Bei, Traction substation. Moscow: Transport, 1986, P. 319.
- [3] E.P. Figurnov, Relay protection. Moscow: UMTs ZhDT, 2009, P. 604.
- [4] G.G. Marquardt, The application of probability theory and computing technology in the power supply system. Moscow: Transport, 1972, P. 224.
- [5] A.B. Kosarev, «The method of calculating the current distribution in the AC traction networks», Vestnik of the Railway Research Institute, T. 76, no. 6, pp. 329-334, 2017.
- [6] Guidelines for relay protection of traction power supply systems. Moscow: TRANSIZDAT, 2005, P. 216.
- [7] STO Railways 07.021.4-2015 «Protection of power supply systems of the railway against short circuits and overload. Part 4. Methodology for selecting protection settings in the AC traction power supply system».
- [8] L.A. German, «Calculations of short circuit currents in the traction network of alternating currents when accounting for external power supply», Electronics and electrical equipment transport, no. 3, pp. 17-23, 2017.
- [9] L.A. German and K.V. Kishkurno, «Comparison of methods for calculating the traction power supply system for different ways of taking into account the parameters of the external network», Vestnik of the Railway Research Institute, no. 1, pp. 16-21, 2013.
- [10] L.A. German, «The method of determining the nodal mutual resistance in the traction network of railways», R. F. Patent 23967077, Aug. 20, 2001.
- [11] A.S. Serebryakov, Transformers. Moscow: Publishing House MEI, 2014, P. 360.
- [12] G.N. Petrov, Electric cars. In 3 parts. Part 1 Introduction Transformer matora. Moscow: Energia, 1974, P. 240.

УДК 621.31

**Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов****РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ  
ГЕНЕРАЦИИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ЭНЕРГИИ – КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет  
им Р.Е. Алексеева

Одна из тенденций развития современных электротехнических комплексов связана с расширением использования энергоустановок распределенной генерации, расположенных в непосредственной близости от потребителей. При этом актуальными являются вопросы влияния энергоустановок распределенной генерации на качество электрической энергии. Энергоустановки малой мощности могут стать причиной появления колебаний напряжения и фликера. В статье представлена расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети 10 кВ в составе с энергоустановкой распределенной генерации. Разработанная модель предназначена для определения дозы фликера в электрической сети, вызванной работой резкопеременной нагрузки. Модель позволяет проводить исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электрической энергии при различных параметрах электрической сети. Приведены результаты расчета размаха колебания напряжения с источником распределенной генерации и без него в зависимости от соотношений индуктивных сопротивлений линии и трансформатора. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании электрических сетей для определения оптимальных параметров сети и резкопеременной нагрузки.

**Ключевые слова:** доза фликера, качество электроэнергии, колебание напряжения, распределенная генерация, моделирование.

**1. Введение**

В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) активно внедряются установки распределенной генерации (РГ), к которым можно отнести источники электроэнергии (ЭЭ), находящиеся в непосредственной близости от потребителей:

- нетрадиционные источники ЭЭ;
- когенерационные установки малой и средней мощности, работающие на основе газотурбинных и парогазовых технологий;
- мини- и микрогидроэлектростанции.

Применение установок РГ позволяет разгрузить электрическую

сеть, снизить потери мощности и энергии, повысить надежность и «живучесть» ЭЭС [1]. Однако распределенная генерация оказывает неоднозначное влияние на качество ЭЭ. С одной стороны, наличие установок РГ позволяет поддерживать уровни напряжений в узлах сети, уменьшать несимметрию и гармонические искажения [1]. С другой стороны, генераторы небольшой мощности могут вызывать колебания напряжения, которые приводят к появлению фликера [1]. Возникновение фликера обычно происходит при резком снижении напряжения в узле подключения установки РГ; при этом применение регуляторов напряжения у генераторов может значительно усложнить ситуацию, особенно если регуляторы не настроены должным образом. При широком использовании установок РГ очень важна точная оценка их воздействия на электрическую сеть, что позволяет избежать ухудшения качества электроэнергии. Поэтому исследование вопросов возникновения и устранения фликера в электрических сетях с установками РГ имеет большую актуальность. Обеспечение качества электрической энергии заключается в степени соответствия ее параметров их установленным значениям [2].

Колебания напряжения являются одним из показателей качества электрической энергии. Они вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резкопеременного характера. Уровень допустимых кондуктивных помех нормируется стандартами. В действующем ранее стандарте и ГОСТ 13109-97 колебания напряжения характеризовались двумя показателями: размахом изменения напряжения и дозой колебаний (дозой фликера). Расчет размахов изменения напряжения проще, чем расчет дозы фликера. С введением в 2014 году в действие введен ГОСТ 32144-2013, в котором колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера. В связи с этим в настоящее время возникла необходимость анализа дозы фликера, вызываемой работой различных потребителей с резкопеременной нагрузкой [3]. По показателю колебания напряжения между новым ГОСТ 32144-2013 и отмененным ГОСТ 13109-97 есть существенные отличия [4], табл. 1. Из табл. 1 видно, что в ГОСТ 32144-2013 колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера [5]. В настоящее время в России именно доза фликера является универсальным показателем электромагнитной совместимости по колебаниям напряжения.

По степени влияния резкопеременных нагрузок на колебания напряжения и распространение этих колебаний можно выделить две группы таких приемников [3]:

- приемники среднего напряжения номинальной мощностью в несколько сот кВт и больше, применяемые в промышленности, например, дуговые печи, сталелитейные и литейные печи, электродвигатели перемен-

- ного тока с частыми пусками и другие;
- приемники низкого напряжения номинальной мощностью в несколько сот кВт и меньше, применяемые в промышленности (сварочные машины, станы) и в коммунально-бытовом хозяйстве (лифты, электроприборы и аппараты в домашнем хозяйстве с электромеханическим и электрическим управлением потребления мощности и другие).

Таблица 1.  
Нормы и требования ГОСТ по показателю качества  
«колебание напряжения»

ГОСТ 13109-97	ГОСТ 32144-2013
– размах изменения напряжения	
Рис. 1 в ГОСТ, кривые 1 и 2. Нормируется допустимое значение в точке общего присоединения к электрическим сетям.	данный показатель отсутствует
– доза фликера	
кратковременная – 1,38 и 1,0 (при лампах накаливания и высоких требованиях к освещенности) длительная – 1,0 и 0,74 (нормируются в точке общего присоединения)	кратковременная – не более 1,38 в течении 100 % времени в неделю; длительная – 1,0 в течении 100 % времени в неделю.
Время интеграции: – кратковременный фликер – 10 минут; – длительный фликер – 2 часа.	

При резкопеременных нагрузках низкого напряжения на величину колебаний напряжения влияют амплитуды изменений активных и реактивных составляющих токов приемников. При резкопеременных нагрузках среднего напряжения в основном влияние оказывают только амплитуды изменений реактивных составляющих этих приемников [6, 7]. Колебания напряжения, возникающие при резкопеременной нагрузке, распространяются по всей сети, вызывая колебания напряжения на зажимах всех, в том числе, потребителей со спокойной нагрузкой.

При колебаниях напряжения наблюдается погасание газоразрядных ламп, отпадают контакты магнитных пускателей, выходят из строя батареи конденсаторов, статические компенсирующие устройства и вентили преобразовательных агрегатов [8]. Также отрицательное влияние испытывают большинство потребителей электроэнергии: индукционные печи; двигатели высокочастотных преобразовательных агрегатов; асинхронные двигатели малой мощности; сварочные установки; системы автоматического регулирования; радиоприборы и компьютеры.

Неоднозначно и влияние распределенной генерации на качество электроэнергии по уровням напряжений. С одной стороны, наличие распределенной генерации в распределительной сети позволяет более стабильно поддерживать уровни напряжений в узлах за счет возможностей этих генераторов по генерированию, в отличие от традиционных распределительных сетей, в которых потери напряжения тем больше, чем дальше от питающей подстанции высокого напряжения. С другой стороны, появляется фликер. Характерно, что фликер развивается при резком снижении напряжения в узле присоединения малого генератора, особенно если генератор асинхронный [9, 10].

Согласно ГОСТ 32144-2013 – Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера. Колебания напряжения характеризуются амплитудой (размахом изменения напряжения)  $\delta U_t$ ; частотой  $f$  и интервалами между следующими друг за другом изменениями напряжения  $\Delta t_k$ ; интенсивностью мигания ламп накаливания, оказывающих раздражающее влияние на зрение человека – (интенсивностью фликера (ИФ) или иначе фликером напряжения (ФН)).

## II. Цели и задачи исследования

Целью разработки расчетно-аналитической модели участка электрической сети с распределенной генерацией является оценка влияния резкопеременной нагрузки на колебания напряжения в электрической сети при различных параметрах электрической сети. При разработке модели поставлены следующие задачи: анализ колебания напряжения в узле нагрузки с распределенной генерацией; анализ влияния дозы фликера на качество напряжения в узле нагрузки.

## III. Описание расчетно-аналитической модели

Схема модели состоит из следующих элементов: шины 10 кВ питающей подстанции как источник бесконечной мощности, линия электропередач 10 кВ, трансформатор ТП 10/0,4 кВ, нагрузка 0,4 кВ, генератор подключенный к шинам 0,4 кВ ТП.

Параметры модели сети следующие.

- Мощность трансформатора принимаем 630 кВА.
- Мощность общей нагрузки –  $0,8 S$  трансформатора.
- Мощность нагрузки, работающей в длительном режиме –  $0,5 S$  общей нагрузки.
- Мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме –  $0,5 S$  общей нагрузки.
- Мощность генератора –  $0,5 S$  нагрузки.

Характеристики элементов модели приведены в табл. 2. В основу

модели заложены математические выражения, описывающие параметры электрической сети. В модели рассматривается схема участка распределительной электрической сети с установкой генерации электрической энергии, показанная на рис. 1. На рис. 2 приведена схема замещения данного участка сети. Источником питания на напряжении 10 кВ является энергосистема и генератор, подключенный на шины ТП 10/0,4 кВ. В качестве нагрузок используются нагрузки, работающие в длительном режиме и в режиме кратковременном.

Таблица 2.  
Характеристики элементов схемы модели

№ п/п	Наименование	Единицы измерения	Величина
1	Напряжение источника питания	кВ	10
2	Марка провода ЛЭП и сечение	-	АС – 25
3	Марка и мощность трансформатора	-	ТМ – 630
4	Напряжения трансформатора В/Н	кВ	10/0,4
5	Суммарная мощность нагрузки	кВА	504
6	Мощность нагрузки работающей в длительном режиме	кВА	250
7	Мощность кратковременной нагрузки	кВА	254
8	Тип генератора	-	СГДМ – 11 – 40 – 6У2
9	Мощность генератора	кВА	325

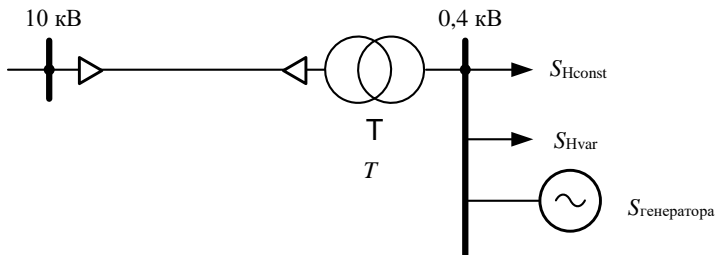


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной электрической сети

Исследования проводились для системы электроснабжения (СЭС) с установкой РГ применительно к схеме, показанной на рис. 2.

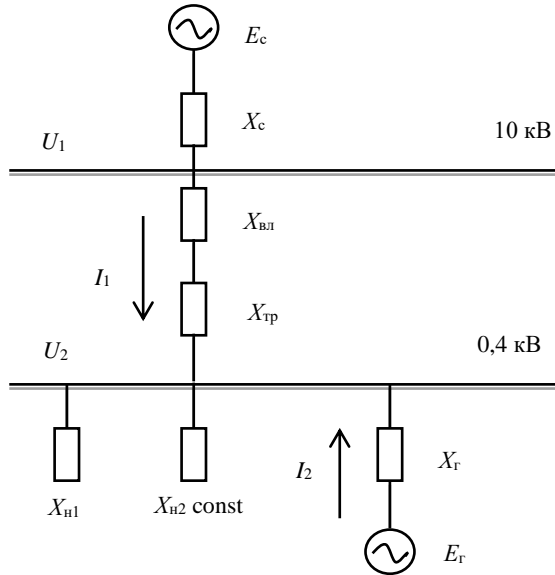


Рис. 2. Схема замещения распределительной электрической сети

Если имеет место повторяющиеся возмущения, расчет кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  производится с использованием зависимости [3]:

$$P_{st} = 0,365 \cdot \delta U_t \cdot F_3 \cdot r^{0,31} \cdot R, \quad (1)$$

где  $\delta U_t$  – колебания напряжения, определяемые по формуле (11), %;  $F_3$  – коэффициента эквивалентности (равен 1 при прямоугольных колебаниях), о.е.;  $r$  – частота изменения напряжения, 1/мин;  $R$  – коэффициент, зависящий от частоты изменения напряжения, который определяется по кривой, рис. 3 [8].

Длительную дозу фликера  $P_{Lt}$  в относительных единицах, на интервале времени  $T_L$ , равном 2 ч, определяют по формуле:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\sum_{k=1}^{12} (P_{stk})^3}, \quad (2)$$

где  $P_{stk}$  – кратковременная доза фликера на  $k$  – м интервале времени.

При расчете схемы замещения использовались следующие условия  $S_0 = 10000$  МВА,  $S_K = 1000$  МВА.

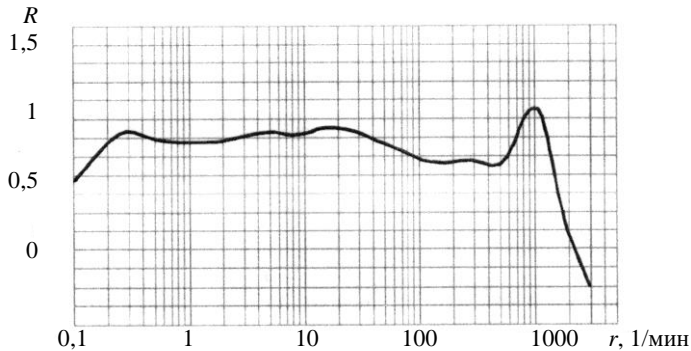


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $R$  от частоты изменения напряжения

Определяем напряжение  $\check{U}_2$  в зависимости от мощности генератора подключенного к шинам РУ – 0,4 кВ потребителя:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{I} \cdot \dot{x}_\Sigma, \quad (3)$$

где  $\check{U}_1$  – напряжение на шинах питающей подстанции;  $\dot{x}_\Sigma$  – суммарное сопротивление схемы замещения модели, включающее в себя сопротивление системы, ЛЭП, трансформатора и генератора.

Колебания напряжения определяются по формуле:

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где  $U_i$  и  $U_{i+1}$  – значения следующих один за другим экстремумов напряжения;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение в узле нагрузки.

Потери напряжения определяются по выражению:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_\Sigma + Q \cdot x_\Sigma}{U_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где  $P$  – активная мощность;  $Q$  – реактивная мощность;  $r_\Sigma$  – суммарное активное сопротивление;  $x_\Sigma$  – суммарное реактивное сопротивление.



Если  $x_{\Sigma} \gg r_{\Sigma}$ , то

$$\Delta U = \frac{Q \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \quad (6)$$

Для нагрузки, работающей в длительном режиме падение напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U = \frac{(Q' - Q_r) \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} = \frac{(P' \cdot \tan \varphi' - P_r \cdot \tan \varphi_r) \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}}, \quad (7)$$

где  $P'$  – активная мощность нагрузки работающей в длительном режиме;  $P_r$  – активная мощность генератора;  $\tan \varphi'$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки работающей в длительном режиме;  $\tan \varphi_r$  – коэффициент реактивной мощности генератора.

Введем обозначение  $\alpha = P_r / (P' + P'')$  и  $\beta = P'' / P'$ , где  $P''$  – активная мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме. При расчете  $\Delta U$  нагрузка, работающая в кратковременном режиме не подключена, соответственно  $P'' = 0$ .

Выражение (7) примет вид:

$$\Delta U' = \frac{P' \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (\tan \varphi' - \alpha \cdot \tan \varphi_r). \quad (8)$$

Потери напряжение при работе нагрузки, работающей в длительном режиме и нагрузки, работающей в кратковременном режиме, рассчитываются:

$$\Delta U'' = \frac{x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (Q' + Q'' - Q_r) = \frac{x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (P' \cdot \tan \varphi' + P'' \cdot \tan \varphi'' - P_r \cdot \tan \varphi_r), \quad (9)$$

где  $P''$  – активная мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме;  $\tan \varphi''$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки, работающей в кратковременном режиме.

Подставив в выражение (9)  $\alpha$  и  $\beta$ , получим потери напряжения при работе нагрузки, работающей в длительном режиме и нагрузки, работающей в кратковременном режиме:

$$\Delta U'' = \frac{p' \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (\tan \varphi' + \beta \cdot \tan \varphi'' - \alpha \cdot \tan \varphi_{\Gamma} \cdot (1 + \beta)). \quad (10)$$

Колебания напряжения для модели сети, приведенной на рис. 1, определяются по формуле:

$$\delta U_i = \frac{|(P_{\Gamma} - p'' \cdot \alpha) \cdot x_{\Sigma} \cdot \beta \cdot \tan \varphi''|}{U_{\text{ном}}^2} \cdot 100. \quad (11)$$

Описанная модель позволяет проводить исследования кратковременной и длительной дозы фликера при различных параметрах работы сети. При анализе колебания напряжения в схеме, показанной на рис. 4, был проведен расчет размаха колебания напряжения с РГ и без РГ в зависимости от отношения  $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$ .

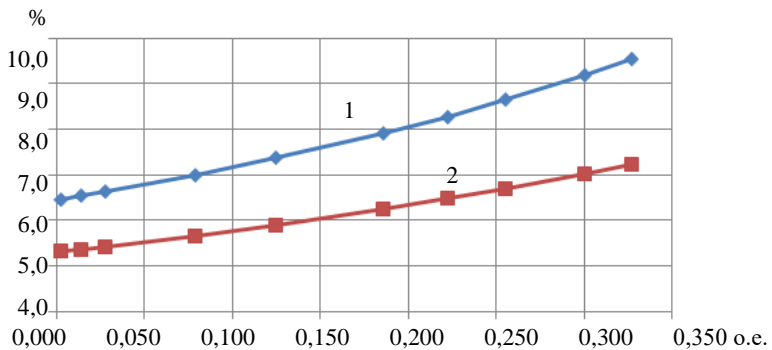


Рис. 4. Размах колебания напряжения с РГ и без РГ в зависимости от отношения  $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$ :  
 1 –  $\delta U^*$  размах колебания напряжения без СГ;  
 2 –  $\delta U^*$  размах колебания напряжения с СГ

Из рис. 4 видно, что размах колебания напряжения уменьшается при подключении РГ на шины 0,4 кВ.

На рис. 5 приведен пример расчета кратковременной дозы фликера для однолинейной схемы распределительной электрической сети, изображенной на рис. 1 в зависимости от отношения  $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$ .

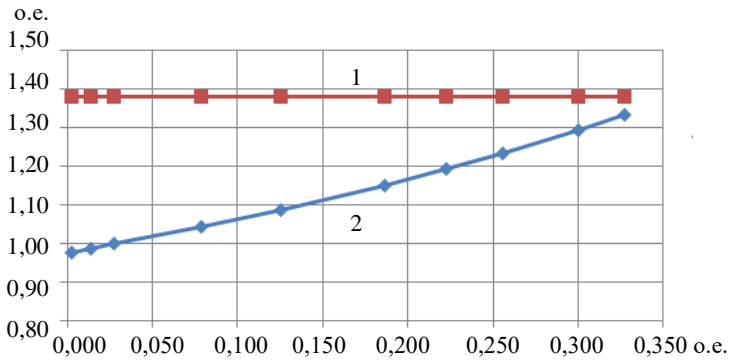


Рис. 5. Кратковременная доза фликера  $P_{st}$  в зависимости от отношения  $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$ :  
1 – норма; 2 – расчетная

На рис. 6 приведен расчет кратковременной дозы фликера в зависимости от соотношения нагрузок. По оси абсцисс указана доля нагрузки, работающей в кратковременном режиме от нагрузки, работающей в длительном режиме при длине линии 17 км.

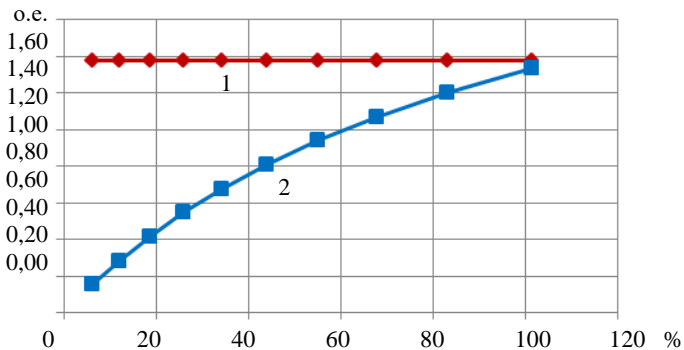


Рис. 6. Кратковременная доза фликера  $P_{st}$  в зависимости от соотношения нагрузок:  
1 – норма; 2 – расчетная

На рис. 7 показана кратковременная доза фликера в зависимости от частоты изменения кратковременной нагрузки при длине линии 1 км и соотношении нагрузок, равном 1.

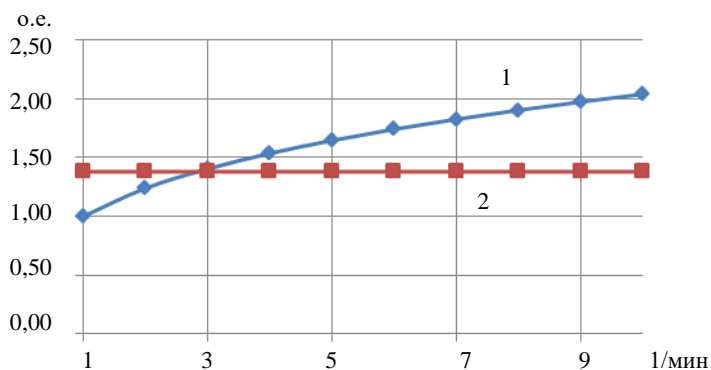


Рис. 7. Кратковременная доза фликера  $P_{st}$  в зависимости от частоты изменения кратковременной нагрузки: 1 – расчетная; 2 – норма

#### IV. Заключение

1. Разработана расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети с распределенной генерацией, позволяющая оценить влияния резкопеременной нагрузки на колебания напряжения в электрической сети при различных параметрах электрической сети.

2. Модель обеспечивает многовариантность расчетов с различными параметрами сети и нагрузки, что позволяет определять оптимальные параметры распределительной сети и резкопеременной нагрузки при проектировании электрических сетей.

© Солнцев Е.Б., 2018  
 © Мамонов А.М., 2018  
 © Фитасов А.Н., 2018

#### Библиографический список

- [1] Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации на основе согласованно настроенных регуляторов // Системы Методы Технологии. 2017. № 4 (36). С. 108-114.
- [2] ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

- [3] Калинина Е.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Вятский государственный университет, Киров, 2017.
- [4] Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. К вопросу о стандартах на качество электрической энергии // Омский научный Вестник. 2015. № 1 (137). С. 145-147.
- [5] Дед А.В., Паршукова А.В. О показателях качества электрической энергии. Нормы ГОСТ 32144-2013 // Омский научный Вестник. 2015. № 1 (137). С. 148-150.
- [6] Войнов С.Л., Гамм А.З., Голуб И.И., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Нейман В.В., Саенко Ю.Л. Нормирование показателей качества электрической энергии и их оптимизация: монография. Иркутск: Гливице, 1988. – С. 249.
- [7] Вагин Г.Я., Котельников О.И. Исследование качества электрической энергии на машиностроительных предприятиях и мероприятия по его улучшению в кн.: Качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. М.: МДНТП, 1977. – С. 74-80.
- [8] Савина Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2014. – С. 182.
- [9] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London: IEE, 2000. – P. 273.
- [10] Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000. P. 222-233.
- [11] Лоскутов А.Б. Решение проблем при переходе электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-25.
- [12] Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25-28.

**E.B. Solncev, A.M. Mamonov, A.N. Fitasov**

## **ANALYTICAL MODEL FOR INVESTIGATION OF EFFECT OF DISTRIBUTED GENERATION ON QUALITY OF ELECTRIC ENERGY-VOLTAGE FLUCTUATION**

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

**Abstract.** One of the trends in the development of modern electrical systems is associated with the increased use of distributed generation power plants located in close proximity to consumers. At the same time, the issues of the influence of distributed generation on the quality of electric energy are relevant. Small power plants can cause voltage fluctuation and flicker. The article presents an analytical model of a 10 kV distribution electric network section with a distributed generation power plant. The developed

model is designed to determine the flicker dose in the electrical network caused by the operation of an abruptly variable load. The model allows studies of the influence of a abruptly variable load on the power quality for various parameters of the electrical network. The results of calculating the magnitude of voltage fluctuations depending on the ratio of the inductive impedance of the line and transformer are given for two situation: with a source of distributed generation and without it, The simulation results can be used in the design of electrical networks to determine the optimal parameters of the network and abruptly variable load.

**Keywords:** distributed generation, flicker dose, power quality, simulation, voltage fluctuation.

### References

- [1] Yu.N. Bulatov and A.V. Kryukov, «Elimination of flicker in networks with distributed generation installations based on consistently configured controllers», *Systems Methods Technology*, vol. 4, no. 36, pp. 108-114, 2017.
- [2] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks, EN 50160 – 2010 ed 3.0*, July 2010.
- [3] E.A. Kalinina, «Thesis for the degree of candidate of technical sciences», Vyatka State University, Kirov, Russia, 2017.
- [4] A.V. Ded, S.V. Biryukov and A.V. Parshukova, «On the issue of standards for the quality of electrical energy», *Omsk Scientific Herald*, vol. 1, no. 137, pp. 145-147, 2015.
- [5] A.V. Ded and A.V. Parshukova, «On the indicators of the quality of electrical energy. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks», *Omsk Scientific Herald* vol. 1, no. 137, pp. 148-150, 2015.
- [6] S.L. Voinov, A.Z. Gamm, I.I. Golub, I.V. Zhezhenko, Yu.S. Zhelezko, V.V. Neiman and Yu.L. Saenko, *Rationing of quality indicators of electric energy and their optimization: monograph*. Irkutsk: Gliwice, 1988, P. 249.
- [7] G.Ya. Vagin and O.I. Kotelnikov, «Investigation of the quality of electrical energy in machine – building enterprises and measures for its improvement» in the book *The quality of electricity in the networks of industrial enterprises*. Moscow: MDNTP, 1977, pp. 74-80.
- [8] N.V. Savina, *Electricity quality: study guide*. Blagoveshchensk: Amur State University, 2014, P. 182.
- [9] N. Jenkins, R. Allan, P. Grossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded Generation*. London: IEE, 2000, P. 273.
- [10] Ph. P. Barker and R.W. De Mello, «Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems», 2000 IEEE PES Summer Meeting, July 11-15, 2000, Seattle, WA, USA, pp. 222-233.
- [11] A.B. Loskutov, «Problem solving in the transition of electric power industry to digital technologies», *Intellectual electrical engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 9-25, 2018.
- [12] E.N. Sosnina and R.Sh. Bedretdinov, «The main directions of development of intelligent electric networks based on adaptive control», *Electrical equipment: operation and repair*, no. 5, pp. 25-28, 2012.

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОСТА ПОТЕРЬ В СТЫКАХ СЕРДЕЧНИКОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Необходимость в расчетных методах прогнозирования дополнительных удельных потерь в стыках  $\Delta P_{уд}$  магнитных систем силовых трансформаторов обусловлена проблемами их опытного определения. Трудности измерения потерь связаны с особенностями применяемых текстурованных электротехнических сталей с полосовой доменной структурой, отличающихся высокими уровнями и анизотропией магнитных свойств, их зависимостью от механических воздействий, условий динамических процессов. В силу влияния многих факторов важным становится анализ структуры прироста  $\Delta P_{уд}$ . В результате специальных экспериментов с шихтованными сердечниками: кольцевым – из стали 2412 и П-образным – из стали 3406 определены структура прироста потерь в косых стыках:  $\Delta P_{уд}$ , как сумма прироста объединенных удельных потерь на гистерезис и вихревые токи  $\Delta P_{уд,гв}$  от основного тангенциального магнитного потока  $\Phi_t$  (при малых значениях коэффициента динамики) и удельных потерь на вихревые токи  $P_{уд,вп}$  от нормальной составляющей потока в стыках  $\Phi_n$  (при значениях коэффициента динамики, соответствующих резкому поверхностному эффекту). Выявлены уровни и характер зависимостей составляющих прироста удельных потерь: от амплитуды магнитной индукции  $B_m$ , удельных потерь в стали  $P_{уд}(B_m)$ , частоты перемагничивания  $f$  при различных количестве пластин сердечника в шихтовке  $m$ , их толщине  $d$  и ширине  $b$ . Установлены общие закономерности определения  $\Delta P_{уд}$  для класса текстурованных сталей. Получены базовые зависимости относительных значений структурных составляющих прироста:  $\delta P_{уд,гв}$  и  $\delta P_{уд,вп}$  П-образного сердечника из стали 3406 и формулы коэффициентов, позволяющие проводить прогнозирование прироста потерь в косых стыках сердечников трансформаторов при других значениях их параметров и условий перемагничивания для различных марок текстурованных холоднокатаных сталей. Сформулирована методика расчета и приведен пример прогнозирования  $\Delta P_{уд}$ .

**Ключевые слова:** косые стыки, прогнозирование прироста потерь, разделение потерь, структура прироста потерь, шихтованный сердечник трансформатора, холоднокатаная электротехническая сталь.

### 1. Введение

С внедрением стыков в шихтованные магнитные системы (МС) возникли: необходимость оценки величины связанных с ними дополнитель-

ных потерь; потребность в понимании особенностей физических процессов и структуры прироста потерь в стыках. Исследования прироста потерь, обусловленных наличием стыков, затруднены зависимостью потерь от технологических и конструкционных особенностей изготовления МС [1-4], высокой чувствительностью крупной полосовой доменной структуры (ДС) текстурованных сталей к механическим воздействиям и динамике перемагничивания [5, 6], сложностью измерения потерь при низком коэффициенте мощности [1]. При изучении влияния стыков делались попытки [7, 8] традиционного деления прироста потерь на гистерезисные и вихревые [9]. При этом не учитывается принципиальное отличие условий перемагничивания в зоне стыка от основного тангенциального магнитного потока  $\Phi_\tau$  в пластинах сердечника и нормального к плоскости пластин потока  $\Phi_n$  при переходе магнитного потока в соседние пластины. Из – за отсутствия обоснованной структуры потерь совершенствование конструкции стыков производилось практически «вслепую» и было направлено в основном на уменьшение концентрации магнитной индукции в зоне стыков и отклонения вектора индукции от направления прокатки (НП) стали для снижения гистерезисных и вихревых потерь от потока  $\Phi_\tau$ .

Целью исследования является определение структуры прироста удельных потерь  $\Delta P_{уд}$ , характера зависимостей, составляющих прироста от параметров косых стыков и условий перемагничивания для получения возможностей прогнозирования потерь перспективных проектов при использовании новых марок сталей.

## **II. Постановка задачи. Условия перемагничивания от тангенциального и нормального потоков в стыках – $\Phi_\tau$ и $\Phi_n$ .**

Предлагается рассматривать потери в стыках с позиции особенностей формирования их под действием двух переменных магнитных потоков, действующих в принципиально отличающихся динамических условиях. В монографии [10] при рассмотрении поверхностного эффекта от синусоидального магнитного потока с частотой  $f$  в бесконечной проводящей пластине (при  $l \gg d; b$ ) длиной  $l$  и с поперечными размерами: толщиной  $d$  и шириной  $b$ , удельной электропроводностью  $\gamma$  и постоянной магнитной проницаемостью  $\mu = \text{const}$  вводится коэффициент динамики  $\xi$ .

Для основного потока  $\Phi_\tau$  поперечным размером является толщина пластин  $d$ , которая для современных электротехнических сталей на промышленной частоте  $f = 50$  Гц должна обеспечивать полное «промагничивание» пластины по всему поперечному сечению; это справедливо при условии  $\xi_\tau = d \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma} < 1,5$  (для  $\mu = \mu_{\max}$ ) [11]. Амплитуда магнитной индукции  $B_{\text{мг}}$  находится в пределах рабочих величин для режимов работы силовых трансформаторов. Прирост удельных потерь от перераспределения потока  $\Phi_\tau$  в стыках (рис. 1, а) будет иметь традиционные составляю-



щие: удельных потерь на гистерезис  $\Delta P_{\text{удг}}$  и вихревые токи  $\Delta P_{\text{удв}}$ . Последние определяются исходным уровнем удельных потерь в стали  $P_{\text{уд}}$  и поэтому существенно зависят от угла  $\alpha$  вектора индукции  $B$  к НП [9, 12] в зависимости от конструкции стыка [2] и степени магнитной анизотропии стали  $K$ , равной отношению максимальных магнитных проницаемостей по осям анизотропии [6].

Для получения качественной оценки проанализируем ориентацию векторов магнитного поля  $B$  и  $H$  от потока  $\Phi_t$  в зоне перекрытия  $t$  косого стыка в произвольно взятых смежных точках 1 (2) на границе соседних пластин, изготовленных из одной стали: ярма – точка 1 и стержня – точка 2 (рис. 1, б). Допускаем, как и в [13], что магнитная анизотропия стали носит линейный 90 – градусный характер. При этом связь между векторами  $B$  и  $H$  имеет тензорный вид, означающий наличие между ними пространственного угла  $\psi$  (рис. 1, б), определяемого, как:

$$\Psi = \arctg (K \cdot \text{tg } \alpha) - \alpha . \quad (1)$$

В работе [6] отмечено, что в для динамических магнитных характеристик пластин вектор  $B$  соответствует средней по толщине пластины магнитной индукции, а вектор  $H$  – напряженности на поверхности пластины. В принятой на рис. 1, б декартовой системе координат ( $x$ ;  $y$ ) направления осей совпадают с направлениями прокатки пластин сердечника трансформатора. Для стержня НП соответствует оси « $y$ », для ярма – оси « $x$ ». Из условия непрерывности тангенциальной составляющей напряженности на границе двух сред следует равенство (совпадение) векторов  $H$  в точках 1 (2).

При равенстве векторов  $H$  модули  $|B|$  в точках 1, (2) соседних пластин равны или близки к равенству. Из условия нечетной симметрии магнитной анизотропии соседних пластин векторы  $H$  будут направлены по биссектрисе угла между осями ( $x$ ;  $y$ ), под углом  $45^\circ$  к каждой оси; При равенстве проекций  $H_x = H_y$ , отношение проекций  $B$  равно степени магнитной анизотропии  $K$ , которая для современных текстурованных холоднокатаных сталей принимает значения  $K = (10 \div 20)$  и более [13]. Направления векторов  $B$  в зоне перекрытия стыка приближаются к НП своей пластины – стержня или ярма (рис. 1, б). Расположение векторов  $B$  в точках 1 (2) пластин ярма и стержня показано для значения  $K = 10$ , для точки 1 –  $B_x = 10 \cdot B_y$ ; для точки 2 –  $B_y = 10 \cdot B_x$ . Угол отклонения  $\alpha$  вектора  $B$  от НП в обеих точках составляет:

$$\alpha = \arctg (1 / K) = 5,71^\circ . \quad (2)$$

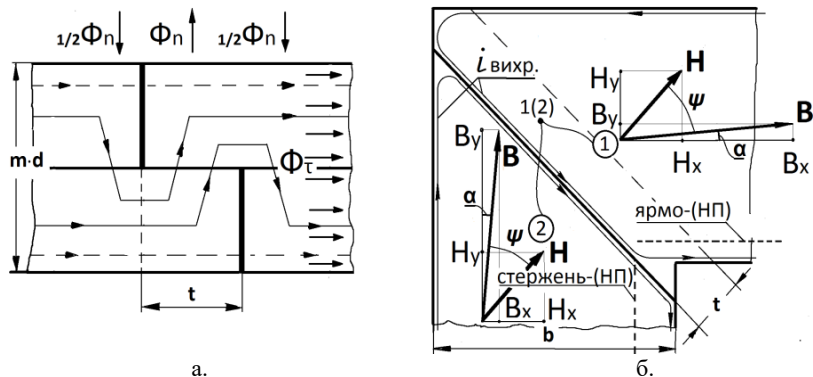


Рис. 1. Перераспределение магнитного потока в косом стыке (а); направления векторов магнитного поля в зоне косого стыка (б)

Это находится в соответствии и с результатами экспериментов [14]. Таким образом, в зоне реального косого стыка сердечника из текстурированной стали для потока  $\Phi_\tau$  положения  $H$  всегда близки к углу  $45^\circ$ , а направления вектора  $B$  в непосредственной близости к НП. С учетом исследований [14, 15] прирост удельных потерь в стыках  $\Delta P_{уд.г}$  и  $\Delta P_{уд.в}$  может быть объединен в  $\Delta P_{уд.гв}$  и находится в пропорциональной зависимости от величины удельных потерь  $P_{уд}$  стали в НП.

В работе [16] отмечено значительное влияние потока  $\Phi_n$  на потери в стыках, однако, как и в [7], авторы ошибочно связывают его с величиной перекрытия стыка  $t$ , ничего не говоря о специфике динамики. Исследованиями [15] показано, что для потока  $\Phi_n$  поперечным размером при расчете  $\xi$  служит ширина пластин сердечников  $b$ .

Даже при низких значениях относительной магнитной проницаемости в направлении действия потока  $\Phi_n$   $\mu' \leq 500$  ( $\mu \leq 0,00063$  Гн/м),  $\gamma = 2 \cdot 10^6$  См/м (для сталей с 3% Si) и  $b = 0,1$  м значение  $\xi_n = b \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma} \approx 44$ . Это соответствует условию РПЭ в пластине, наступающему в линейной среде уже при  $\xi > 4$  [10].

Соотношение потоков  $\Phi_n$  и  $\Phi_\tau$  определяется выражением:

$$(\Phi_n = B_n \cdot t \cdot b) \leq (\Phi_\tau = B_\tau \cdot m \cdot d \cdot b), \quad (3)$$

где  $m$  – число пластин позиции шихтовки,  $t$  – размер перекрытия стыка (рис. 1). Знак неравенства обусловлен тем, что часть магнитного потока  $\Phi_n$ , возрастающая с насыщением стали, проходит через технологический зазор в стыке (рис. 1, а – пунктиром). Амплитуда средней по сечению зоны перекрытия стыка индукции  $B_{мн}$  от потока  $\Phi_n$  в десятки раз меньше  $B_{мг}$ :

$$B_{мп} \leq B_{мг} \cdot m \cdot d \cdot b / (t \cdot b); \text{ т.е. } B_{мп} \leq B_{мг} \cdot (m \cdot d) / t. \quad (4)$$

Так же, как в [14, 15], полагаем, что прирост удельных потерь от действия  $\Phi_n$  в условиях РПЭ связан только с удельными потерями на вихревые токи  $P_{уд.вп}$ , контуры которых вытесняются к наружным границам пластин (рис. 1, б). Потерями на гистерезис можно пренебречь в виду малости  $B_{мп}$ . Потери  $P_{уд.вп}$  зависят от заданных рабочих значений амплитуды индукции  $B_m$ , частоты  $f$ , удельной электропроводности стали  $\gamma$ , толщины  $d$ , ширины  $b$  и числа пластин в шихтовке  $m$  и в условиях РПЭ практически не зависят от магнитных свойств материала в НП. В целом, процессы от действия потоков  $\Phi_\tau$  и  $\Phi_n$  и связанных с ними контуров замыкания вихревых токов, происходят в ортогональных плоскостях при резко отличающихся значениях коэффициентов динамики  $\xi_\tau$  и  $\xi_n$  и малых уровнях индукции от потока  $\Phi_n$ . Поэтому принимаем допущение о суперпозиции этих процессов диссипации энергии и связанных с ними добавочных потерь в зоне стыков.

### III. Результаты экспериментального исследования прироста потерь в стыках кольцевого и П-образного сердечников

Исследования прироста потерь в стыках проводились на двух шихтованных сердечниках: кольцевом из динамной стали и П-образном из текстурованной стали (рис. 2).

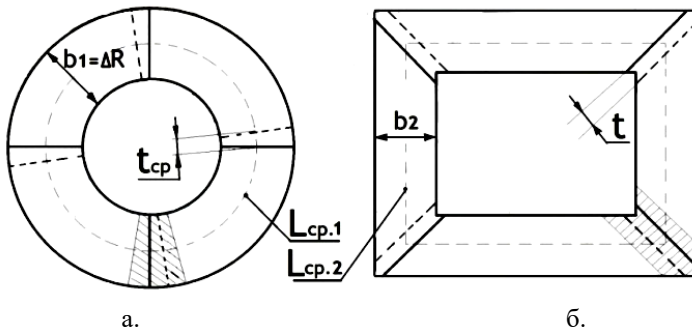


Рис. 2. Шихтованные сердечники: кольцевой из динамной стали (а); П-образный из текстурованной стали (б)

Проведенные анализ направлений вектора  $B$  в зоне косого стыка и исследование распределения магнитного поля в кольцевом анизотропном сердечнике [17] подтвердили правомерность выбора для изучения структуры прироста потерь шихтованного сердечника кольцевой формы ( $C_{№1}$ )

массой  $G_1 = 0,959$  кг, шириной спинки  $b_1 = \Delta R = 0,0606$  м и длиной средней силовой линии  $L_{ср.1} = 0,536$  м. В качестве материала  $C_{№1}$  была выбрана холоднокатаная динамная сталь марки 2412 с содержанием 3% Si ( $d = 0,5$  мм). Эта сталь имеет мелкокристаллическую структуру и мелкую ДС с магнитными свойствами, не чувствительными к механическим напряжениям и динамике перемагничивания. Она обладает также минимальной магнитной анизотропией и высоким уровнем удельных потерь –  $P_{уд.1,5/50} = 4,2$  Вт/кг (при  $B_m = 1,5$  Тл и  $f = 50$  Гц). Такие особенности магнитных свойств и применение специальной методики, основанной на последовательных измерениях, [14], позволили осуществить разделение прироста потерь в стыках в абсолютном –  $\Delta P_{уд}$  и относительном виде –  $\delta P$  при различных  $B_m = \text{const}$ :

$$\Delta P_{уд} = \Delta P_{уд.гв} + P_{уд.вл}; \quad \delta P = \delta P_{гв} + \delta P_{вл}, \quad (5)$$

где  $\delta P = \Delta P / P \cdot 100\%$ ,  $\delta P_{гв} = \Delta P_{гв} / P \cdot 100\%$ ,  $\delta P_{вл} = \Delta P_{вл} / P \cdot 100\%$ .

Прирост потерь  $\Delta P_{уд}$  определялся, как разница измерений потерь в  $C_{№1}$  сначала на сплошном кольце –  $P$ , а потом после разрезания кольца на четверти (рис. 2, а), при появлении 4-х «спрямленных» косых стыков, –  $P_{ст}$  при разных значениях  $m = (1; 2; 8)$  [14]:

$$\Delta P_{уд} = (P_{ст} - P) / G_1. \quad (6)$$

Составляющая  $\delta P_{гв}$  для наибольшего значения  $m = 8$  была выделена измерениями петель гистерезиса в статике, при  $f = 0$  [14]. Составляющая  $\delta P_{вл}$  на  $f = 50$  Гц определялась, как разность:

$$\delta P_{вл} = \delta P - \delta P_{гв}. \quad (7)$$

В итоге определены зависимости структурных составляющих  $\delta P_{вл}$  и  $\delta P_{гв}$ , от  $B_m$  и  $m$  на частоте  $f = 50$  Гц (рис. 3, б) [14].

Результаты получили дополнительное обоснование на частоте  $f = 100$  Гц [15]. В частности, на рис. 3, б с ростом  $f$  зависимость  $\delta P_{гв}(B_m)$  (при  $m = 8$ ) остается без изменения, а увеличение  $\delta P$  происходит за счет составляющей  $\delta P_{вл}$ . При этом экспериментально подтверждается и характер зависимости:  $\delta P_{вл} \equiv (f)^n$ , где  $n = (1,5-1,8)$ , соответствующий условию РПЭ [10].

Сердечник П-образной формы с косыми стыками ( $C_{№2}$ ) [14], (рис. 2, б) массой  $G_2 = 13,8$  кг из текстурованной стали с крупной полосовой ДС марки 3406 с 3% Si ( $d_2 = 0,3$  мм) имел ширину пластин  $b_2 = 0,12$  м,  $L_{ср2} = 2,505$  м и  $P_{уд.1,7/50} = 1,14$  Вт/кг вдоль НП. Экспериментальные исследования

потерь на  $f = 50$  Гц и различных  $B_M$  при варьировании параметров стыка позволили установить, что зависимость  $P_{ст}(t)$  весьма слабая. Так для варианта шихтовки  $m = 1$  увеличение потерь  $P_{ст}$  в  $C_{№2}$  при наибольшей индукции  $B_M = 1,7$  Тл и изменении зоны перекрытия стыка  $t$  с 4 мм до 20 мм (в 5 раз) увеличение  $P_{ст}$  не превышает 4,7% [14]. Тем самым рассуждения при  $\mu = \text{const}$ , что в зоне стыка направления вектора  $B$  близки к НП, справедливы и для общего случая нелинейности  $\mu$ , а результаты разделения прироста удельных потерь в стыках  $C_{№1}$  применимы для  $C_{№2}$ .

На рис. 3, а кривые удельных потерь  $P_{уд}(m)$  при  $m = (1; 2; 4)$  и различных  $B_M$  в  $C_{№2}$  из стали 3406 аналогичны подобным кривым  $C_{№1}$  из стали 2412  $m = (1; 2; 8)$ . При этом зависимости прироста удельных потерь  $\Delta P_{уд}(m)$  хорошо аппроксимируются выражением:

$$\Delta P_{уд}(m) = \Delta P_{уд,1} \cdot m^{0,72}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{уд,1}$  – прирост удельных потерь в стыках при  $m = 1$ .

Значения  $\Delta P_{уд,1}$  в сердечнике  $C_{№2}$  при различных  $B_M$  находятся из (8) почленным вычитанием по итогам измерений потерь  $P$  двух вариантов шихтовки –  $m_1$  и  $m_2$ :

$$\Delta P_{уд,1} = [P(m_2) - P(m_1)] / [G \cdot (m_2^{0,72} - m_1^{0,72})]. \quad (9)$$

По имеющимся результатам измерения потерь  $C_{№2}$  при  $m_1 = 1$ ,  $m_2 = 4$  [14] с использование (9) можно найти значения удельных потерь в  $C_{№2}$  при исключении влияния стыков (на рис. 3, а для стали 3406 отмечены точками при  $m = 0$ ).

Сходный характер кривых  $\delta P(B_M)$  для  $m = (1; 2; 8)$  на рис. 3, б при принципиально отличающихся –  $\delta P_{гв}(B_M)$  и  $\delta P_{вн}(B_M)$  возможен только при условии независимости их долевого соотношения от  $m$ . Поэтому структурные составляющие прироста потерь будут иметь такую же, как в (8), пропорциональность от толщины позиции (слоя) шихтовки [14]:

$$\delta P_{гв} \equiv \delta P_{вн} \equiv (m \cdot d)^{0,72}. \quad (10)$$

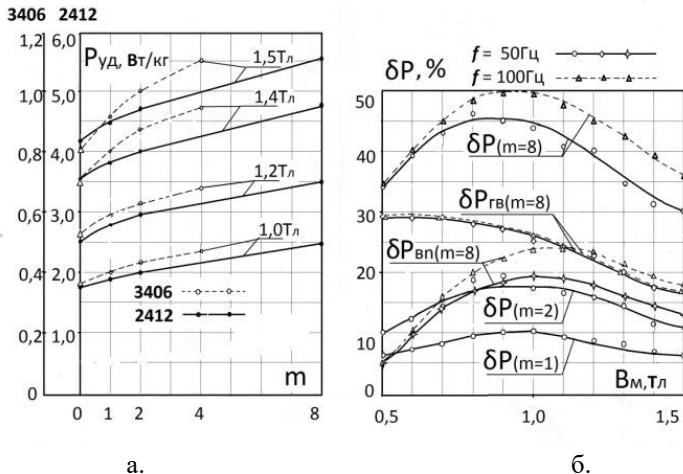


Рис. 3. Зависимости удельных потерь от числа пластин шихтовки (а); зависимости относительного прироста потерь в стыках от амплитуды магнитной индукции (б)

#### IV. Возможности прогнозирования прироста потерь в стыках

Исследованиями сердечников  $C_{№1}$  и  $C_{№2}$  фактически показано [14, 15], что наличие структуры прироста потерь в стыках и ряда основных параметров одного сердечника позволяет рассчитать значения прироста удельных потерь и их структурных составляющих для другого сердечника с аналогичной конфигурацией стыков. На рис. 4, а представлены расчетные зависимости  $\delta P_{гв}(B_m)$ ,  $\delta P_{вл}(B_m)$  и  $\delta P(B_m)$  для  $C_{№2}$  из стали 3406, полученные в [15] путем пересчета аналогичных экспериментальных кривых для  $C_{№1}$ . Соответствие их экспериментальным значениям  $\delta P(B_m)$  (рис. 4, а – пунктир) свидетельствует о правильности подхода к структуре составляющих потерь, определению списка параметров пересчета:  $q$ ,  $m$ ,  $d$ ,  $b$  и  $P_{уд}$  и соответствующих коэффициентов на основе установленных в [14] зависимостей. Дополнительно подтверждается и достоверность исходных зависимостей составляющих прироста потерь стали 2412, представленных на рис. 3, б.

В [15] путем такого пересчета получены зависимости  $\delta P_{гв}(B_m)$ ,  $\delta P_{вл}(B_m)$  для  $C_{№2}$  из текстурованной стали 3406 которые можно принять за базовые для прогнозирования потерь в другом сердечнике с косыми стыками из другой марки стали при  $f = 50$  Гц и синусоидальной индукции с заданной амплитудой  $B_m$ .

В качестве примера возьмем трехфазный трансформатор с плоской шихтованной МС типа ТМ-1600/35, данные для которого приведены в [2].

В [4] при анализе влияющих факторов на дополнительные потери трехфазного трансформатора мощностью 100 кВА отмечаются незначительные дополнительные потери, связанные с наличием Т-стыков. Допускаем поэтому, что с учетом доминирования в стыках потерь  $P_{вп}$  [15] величина прироста удельных потерь в Т-стыках, как и в Г-стыках, пропорциональна длине линии стыка. В качестве материала выбираем японскую сталь с 3% Si с лазерной обработкой толщиной  $d = 0,15$  мм и удельными потерями:  $P_{уд.1,3/50} = 0,30$  Вт/кг;  $P_{уд.1,5/50} = 0,41$  Вт/кг и  $P_{уд.1,7/50} = 0,57$  Вт/кг [18].

Считаем, что сердечник массой  $G = 1815$  кг имеет прямоугольное сечение с шириной пластин  $b = 0,23$  м при  $m = 2$ . Кратность доли стыков  $q$ , равную отношению общей длины стыков  $L_{ст} = 1,95$  м к общей длине силовой линии МС –  $L_{сп} = 5,26$  м [14], принимаем равной  $q = 1/2,7$ .

Формулы для расчета  $\delta P_{гв}$  и  $\delta P_{вп}$  по базовым значениям  $\delta P_{гв.баз}$  и  $\delta P_{вп.баз}$  при различных  $B_M = \text{const}$  имеют вид:

$$\delta P_{гв} = \delta P_{гв.баз} \cdot C_q \cdot C_m \cdot C_d; \quad (11)$$

$$\delta P_{вп} = \delta P_{вп.баз} \cdot (C_q \cdot C_m \cdot C_d \cdot C_b \cdot C_f) / C_p, \quad (12)$$

где:  $C_q = q/q_{баз}$ ;  $C_m = (m/m_{баз})^{0,72}$ ;  $C_d = (b/b_{баз})^{0,72}$ ;  $C_b = (b/b_{баз})^{0,5}$ ;  $C_p = P_{уд}/P_{уд.баз}$ ;  $C_f = (f/f_{баз})^n$  – коэффициенты приведения составляющих относительного прироста потерь с базовых на прогнозируемые значения.

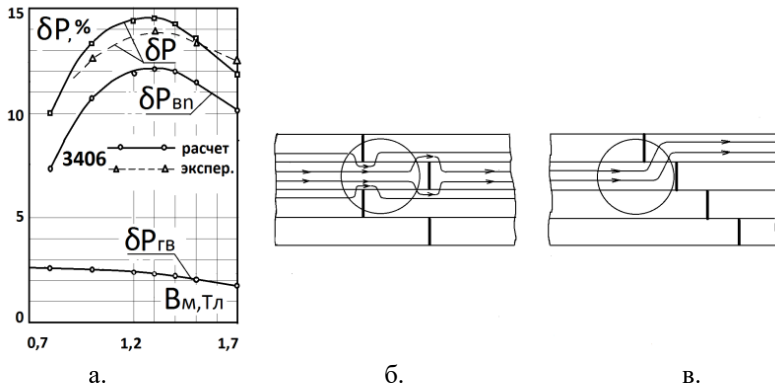


Рис. 4. Зависимости относительного прироста потерь в стыках от амплитуды индукции (а); схемы укладки пластин в косых стыках шихтованных сердечников: внахлест – butt-lap (б); ступенчатая – step-lap (в)

Определяем значения коэффициентов приведения при  $q_{\text{баз}} = 1/3,7$  [14];  $m_{\text{баз}} = 1$  для  $V_M = 1,7$  Тл:

$$C_q = 3,7/2,7 = 1,37; C_m = (2/1)^{0,72} = 1,65; C_d = (0,15/0,3)^{0,72} = 0,607; \\ C_b = (0,23/0,12)^{0,5} = 1,38; C_p = 0,57/1,14 = 0,5; C_f = 1.$$

Тогда из (11), (12) получаем:

$$\delta P_{\text{гв}} = 1,76 \cdot 1,37 \cdot 1,65 \cdot 0,607 = 2,41 [\%]; \\ \delta P_{\text{вл}} = 10,1 \cdot 1,37 \cdot 1,65 \cdot 0,607 \cdot 1,38 / 0,5 = 38,2 [\%].$$

Удельная величина прироста потерь  $\Delta P_{\text{уд}}$  в стыках МС трансформатора ТМ-1600/35 определяется, как:

$$\Delta P_{\text{уд}} = (\delta P_{\text{гв}} + \delta P_{\text{вл}}) \cdot P_{\text{уд}} / 100\% = 0,231 \text{ Вт/кг}.$$

Полные потери в трансформаторе при  $V_M = 1,7$  Тл равны:

$$P = (P_{\text{уд}} + \Delta P_{\text{уд}}) \cdot G = 1454 \text{ Вт}.$$

В табл. 3 сведены базовые величины  $C_{\text{№1}}$  и прогнозируемые значения составляющих  $\delta P_{\text{гв}}$ ,  $\delta P_{\text{вл}}$ , рассчитанные с применением (11), (12) а также величины  $\Delta P_{\text{уд}}$  и доли прироста  $\delta P_{\text{вл}}$  при различных  $V_M$  для трансформатора ТМ – 1600/35.

Таблица 3.  
Базовые и прогнозируемые значения составляющих прироста удельных потерь в стыках

$V_M$	$\delta P_{\text{гв}}$	$\delta P_{\text{вл}}$	$P_{\text{уд}}$	Доля $P_{\text{вл}}$	$P_{\text{уд}}$	$\delta P_{\text{гв}}$	$\delta P_{\text{вл}}$	$\Delta P_{\text{уд}}$	Доля $P_{\text{вл}}$
	Базовые величины				Прогнозируемые значения				
Тл	%		Вт/кг	%	Вт/кг	%		Вт/кг	%
1,3	2,32	12,1	0,612	83,9	0,30	3,18	46,7	0,150	93,6
1,5	2,06	11,5	0,826	84,8	0,41	2,82	43,9	0,192	94,0
1,7	1,76	10,1	1,14	85,1	0,57	2,41	38,2	0,231	94,1

Проведенные исследования и полученные результаты распространяются на шихтованные сердечники с косыми стыками внахлест, называемые также – butt-lap. Как показано на рис. 2, б, такая форма стыка обеспечивает направление магнитной индукции, близкое к НП. При этом имеет место значительное насыщение узких областей в зоне стыков пластин, а,



значит, и дополнительное увеличение потерь [16]. На рис. 5, б представлена схема шихтовки butt-lap стыков и схематичное распределение силовых линий индукции.

Наиболее перспективной и используемой в настоящее время считается конструкция косого стыка МС силовых и преобразовательных трансформаторов с повторяющейся ступенчатой укладкой пластин типа step-lap [16, 19], представленной на рис. 5, в. В [19] отмечается, что при общем снижении шума, вибрации и потерь в МС в стыках возрастает доля удельных потерь от магнитного потока  $\Phi_n$ . В [16] из-за увеличения  $\Phi_n$  ставятся под сомнения несомненные достоинства стыка step-lap. При этом ни в одной из работ не проводится анализ структуры прироста удельных потерь в стыках.

По сравнению со стыками типа butt-lap в стыках типа step-lap меняется соотношение составляющих  $\Delta P_{уд.гв}$  и  $P_{уд.вп}$ , поскольку при изменении насыщения наиболее узких зон (на рис. 5 обведено кружками) меняется соотношение потоков  $\Phi_n$  и потоков  $\Phi_r$ , проходящих через воздушный зазор в стыке. Однако, для обоих типов стыков характерны одни и те же, рассмотренные выше (в разделе II), особенности физических процессов. Значит для стыка step-lap остаются справедливы те же коэффициенты приведения:  $C_q$ ;  $C_m$ ;  $C_d$ ;  $C_b$ ;  $C_p$ ;  $C_f$ , и формулы (11), (12). Необходимы только новые базовые величины, полученные для изменившегося соотношения зависимостей  $\delta P_{уд.гв}(B_m)$  и  $\delta P_{уд.вп}(B_m)$ . При этом может быть использована предложенная методика разделения прироста потерь в стыках на кольцевом шихтованном сердечнике.

## V. Заключение

Выявленная структура прироста потерь в стыках и последующий анализ экспериментальных зависимостей кольцевого и П-образного сердечников позволяют сформулировать следующие выводы.

1. С использованием полученных базовых значений прироста потерь в стыках типа butt-lap магнитопроводов возможно проводить прогнозирование уровней структурных составляющих. А также определять прирост потерь в произвольной плоской шихтованной магнитной системы из любой текстурованной электротехнической стали.

Это имеет особое значение из-за невозможности проведения непосредственных измерений прироста потерь.

2. Установлено возрастание доли потерь на вихревые токи в стыках от нормальной составляющей основного магнитного потока с улучшением магнитных свойств текстурованных сталей.

3. Возрастание доли удельных потерь на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока имеет место также при увеличении ширины пластин магнитной системы.

4. Применение предложенной методики позволяет по данным эксперимента двух значений числа пластин позиции шихтовки определять потери в сердечнике при исключении влияния стыков.

5. В настоящее время находит применение новый прогрессивный способ ступенчатой шихтовки *step-lap*. Для выявления закономерностей структурных составляющих прироста потерь конструкции стыков *step-lap* рекомендуется провести эксперименты по предлагаемой методике на кольцевом сердечнике из динамной стали с высоким уровнем удельных потерь.

© Калинин Е.В., 2018

© Чивенков А.И., 2018

### Библиографический список

- [1] Лизунов С.Д. Итоги Сессии СИГРЭ 1988г. Трансформаторостроение // Электричество. 1989. № 8. С. 37-45.
- [2] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] Кравченко А.Н. Анализ эффективности мероприятий по снижению добавочных потерь в мощных силовых трансформаторах // Тезисы докладов 4 Респ. научн.-техн. конф. «Соврем. пробл. энерг. электротехн. оборуд.», 1985, Киев. С. 88-89.
- [4] Qader A.A., Basak A. Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core // IEEE Trans. Magn. 1982. № 6 (18). P. 1487-1489.
- [5] Зайкова В. А., Старцева И. Е., Филиппов Б. Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992.
- [6] Калинин Е. В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2018. № 2 (121). С. 96-105.
- [7] Černý V. Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů // Elektrotechnický obzor, SV72, 1983. № 11. P.651-652.
- [8] Nakata T., Kawase Y., Moriyasa S. Магнитные характеристики стыков сегментов сердечника статора // Дэнки гаккай ромбунси, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. 1987. № 1 (107). P.109-114.
- [9] Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Энергия, 1974.
- [10] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. М.: Энергия, 1967.
- [11] Калинин Е.В. Нормализованный подход к моделированию потерь на перемагничивание в листовой электротехнической стали // Межвуз. Сборн. научн. тр. «Электрооборудование промышленных установок», 1986, Горький. С. 159-164.
- [12] Молотиллов Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали. Справочник. М.: Металлургия, 1989.

- [13] Калинин Е.В., Любимый В.И., Першин В.В., Тильк В.Т., Анализ и математическое описание характеристик намагничивания анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей // Электротехника. 1985. № 10. С. 34-37.
- [14] Калинин Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь // Труды конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики», 2018, Н. Новгород. С. 53-61.
- [15] 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), *в печати*.
- [16] Levin M.I., Пентегов И. В., Рымар С. В., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехника і Електромеханіка, 2014. № 1. С. 40-43.
- [17] Калинин Е.В., Вагапов Ю.Ф. Магнитное поле в кольцевом анизотропном шихтованном сердечнике // Межвуз. сборн. научн. тр. «Электрооборудование промышленных установок», 1998, Н. Новгород. С. 127-132.
- [18] Nosawa T., Matsuo Y. Magnetic properties and domain structures in domain refined grainoriented silicon steel // J. Appl. Phys, 1988. № 8 (63). P. 2966-2970.
- [19] Nakata T., Takahashi N., Kawase Y. Свойства стыков магнитопроводов со ступенчатой укладкой пластин. Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores // IEEE Trans. Magn., 1982. № 6 (18). P.1055-1057.

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

## **FORECASTING THE INCREASE OF LOSSES IN JOINTS OF POWER TRANSFORMERS CORE**

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

**Abstract.** The need for computational methods for predicting additional specific losses at the  $\Delta P_{ud}$  junctions of magnetic systems of power transformers is caused by the problems of their experimental determination. The difficulties of measuring losses are associated with the peculiarities of the applied texturized electrical steels with a strip domain structure, which are distinguished by high levels and anisotropy of magnetic properties, their dependence on mechanical effects, conditions of dynamic processes. Due to the influence of many factors, it becomes important to analyze the growth structure of  $\Delta P_{ud}$ . As a result of special experiments with laminated cores: annular-from steel 2412 and U-shaped from steel 3406, the structure of the increase in losses at oblique junctions was determined:  $\Delta P_{ud}$ , as the sum of the increase in combined specific losses for hysteresis and eddy currents  $\Delta P_{ud,he}$  from the main tangential magnetic flux  $\Phi_t$  (for small values of the dynamics coefficient) and specific losses for eddy currents  $R_{ud,en}$  from the normal component of the flux in the junction  $\Phi_n$  (for values of the dynamics coefficient corresponding to a sharp surface effect). The levels and nature of dependencies of

the components of the increase in specific losses are revealed: on the amplitude of magnetic induction  $B_m$ , specific losses in steel  $P_{ud}(B_m)$ , frequency of magnetization reversal  $f$  with different number of core plates in charge  $m$ , their thickness  $d$  and width  $b$ . The general regularities of the definition of  $\Delta P_{ud}$  for the class of textured steels are established. The basic dependences of the relative values of the structural components of the gain are obtained:  $\delta P_{ud.he}$  and  $\delta P_{ud.en}$  U-shaped core made of steel 3406 and the formula of coefficients, allowing prediction of the increase in losses in the oblique joints of transformer cores for different values of textured cold-rolled steels. A calculation method is formulated and an example of  $\Delta P_{ud}$  forecasting is given.

**Keywords:** cold rolled electrical steel, loss prediction, loss sharing, loss gain structure, oblique joints, transformer core laminated.

### References

- [1] S.D. Lizunov, «Results of the CIGRE Session 1988. Transformer», Electricity, vol. 8, pp. 37-45, 1989.
- [2] P.M. Tikhomirov, Calculation of transformers. Moscow: Energoatomizdat Publishing House, 1986.
- [3] A.N. Kravchenko, «Analysis of the effectiveness of measures to reduce additional losses in high-power power transformers», in proc. Actual problems energy. Electricity Equipment, 1985, Kiev, pp. 88-89.
- [4] A.A. Qader and A. Basak, «Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core», IEEE Trans. Magn., vol. 6, no. 18, pp. 1487-1489, 1982.
- [5] V.A. Zaikova, I.E. Startseva and B.N. Filippov, Domain Structure and Magnetic Properties of Electrical Steels. Moscow: Science Publishing House, 1992.
- [6] E. V. Kalinin, «Magnetic field in an anisotropic laminated core. Recommendations for the determination of the degree of magnetic anisotropy of cold-rolled electrical steels», Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 2, no. 121, pp. 96-105, 2018.
- [7] V. Černý, «Přispěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů», Elektrotechnický obzor, SV72, vol. 11, pp. 651-652, 1983.
- [8] T. Nakata, Y. Kawase, and S. Moriyasa, «Magnetic characteristics of the joints of the stator core segments», Denki Gakkai Rhombunsi, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap, vol. 1, no. 107, pp. 109-114, 1987.
- [9] V.V. Druzhinin, Magnetic properties of electrical steels. Moscow: Energy publishing house, 1974.
- [10] J. Lammeraner and M. Staffl, Eddy currents. Moscow: Energy publishing house, 1967.
- [11] E.V. Kalinin, «Normalized Approach to Modeling Loss on Remaking in Sheet Electrical Steel», in proc. Electrical Equipment for Industrial Installations, 1986, Gorky, pp. 159-164.
- [12] B.V. Molotilov, Cold-rolled electrical steel. Moscow: Metallurgy Publishing House, 1989.
- [13] E.V. Kalinin, V.I. Lyubiviy, V.V. Pershin, and V.T. Til'k, «Analysis and Mathematical Description of the Characteristics of the Magnetization of Anisotropic Cold-Rolled Electrical Steels», Electrotechnika, 1985, no. 10, pp. 34-37.

- 
- [14] E.V. Kalinin, «Losses in the joints of laminated cores. Part 1. Experimental study of the main influencing factors for the increase in electromagnetic losses», in proc. Actual problems of electric power industry, 2018, N. Novgorod, pp. 53-61.
  - [15] E.V. Kalinin and A.I. Chernov, «Losses in the joints of laminated cores. Investigation of opportunities to reduce the growth of losses», Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 4, no. 123, 2018, in print.
  - [16] 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.
  - [17] E.V. Kalinin and Yu.F. Vagapov, «The magnetic field in an anisotropic ring laminated core», in proc. Electrical Equipment for Industrial Installations, 1998, N. Novgorod, pp. 127-132.
  - [18] T. Nosawa, Y. Matsuo, «Magnetic properties and domain structures in domain refined grainoriented silicon steel», Appl. Phys., vol. 8, no. 63, pp. 2966-2970, 1988.
  - [19] T. Nakata, N. Takahashi and Y. Kawase, «Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores», IEEE Trans. Magn., vol. 6, no. 18, pp. 1055-1057, 1982.

УДК 620.9

С.В. Голубев

## ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА БАЗЕ ВИЭ

Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения

Повышение эффективности использования в автономных электротехнических комплексах и системах энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является важным направлением развития современной электроэнергетики России. Статья посвящена вопросам оптимизации затрат при выборе ВИЭ для энергообеспечения автономных объектов. Проведен анализ достоинств и недостатков использования энергоустановок на базе ВИЭ с учетом особенностей российской электроэнергетики. Установлено, что для обеспечения эффективного применения ВИЭ требуется оптимизация конфигурации энергоустановок с целью уменьшения удельной стоимости электроэнергии. Выполнен обзор и систематизированы результаты многолетних исследований потенциала ветровой и солнечной энергии на территории Российской Федерации. Определены районы России, перспективные для использования ВИЭ. Исходя из полученных результатов, сформулированы основные критерии для выбора оптимальной конфигурации энергоустановок на базе ВИЭ. Рассмотрены экономические аспекты применения ВИЭ и приведены примеры их успешного внедрения в автономные системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** автономные системы электроснабжения, ветровая энергетическая установка, возобновляемые источники энергии, критерии выбора, солнечная электростанция.

### 1. Введение

В последние десятилетия во многих странах действовали государственные программы развития технологий возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1], что определило международный тренд развития систем электроснабжения нового поколения. В РФ также существуют законодательные акты, направленные на повышение энергетической эффективности [2], что позволяет не только перенимать опыт зарубежных коллег, но и развивать собственные технологии и схемотехнические решения.

Сегодня в России ВИЭ активно используется для автономного электроснабжения удаленных объектов, расположенных в районах с неразвитой электросетевой инфраструктурой и в условиях минимального технического обслуживания. Накладываемые ограничения требуют использования наиболее энергоэффективных и экономичных решений.

Несмотря на достаточно высокий уровень интереса к использованию ВИЭ, среди специалистов постоянно возникают споры об эффективности и целесообразности развития данного направления. Причинами этих разногласий являются относительно невысокий уровень энергоотдачи и высокая стоимость энергоустановок на базе ВИЭ.

Вышеуказанные разногласия являются объективным поводом для проведения анализа достоинств и недостатков ВИЭ, определения оптимальных технических решений и сфер применения энергоустановок на базе ВИЭ.

## **II. Цель и задачи исследования**

Целью данного исследования является определение основных критериев выбора элементной базы энергоустановок на базе ВИЭ. Для этого, в первую очередь, требуется оценить преимущества и недостатки систем электроснабжения на основе ВИЭ. Необходимо определить регионы России с высоким потенциалом применения энергоустановок на базе ВИЭ, рассмотреть возможность комбинации нескольких типов ВИЭ и выбрать оптимальную элементную базу энергоустановок для конкретного района. Далее, следует сформулировать критерии выбора типа и производительности силового оборудования энергоустановок на базе ВИЭ, и в заключение – проанализировать экономические аспекты применения энергоустановок на базе ВИЭ.

## **III. Анализ достоинств и недостатков энергоустановок на базе ВИЭ**

Выделим достоинства энергоустановок на базе ВИЭ:

- высокий уровень автономности (для выработки энергии не требуется топлива, т. к. источником является энергия солнца, ветра, потока газа);
- на территории РФ значительная часть регионов обладает достаточным ветровым или солнечным потенциалом для использования ВИЭ;
- современное состояние дел и темпы развития технологий уже сегодня обеспечивают достаточно высокий уровень и постоянный рост эффективности использования потенциала ВИЭ;
- современное оборудование электростанций и энергоустановок на базе ВИЭ имеет значительный срок службы (от 20 лет и выше) и достаточно высокий уровень надежности;
- наличие накопителя электроэнергии (аккумуляторных батарей) позволяет обеспечить покрытие кратковременных пиковых нагрузок (в 5-7 раз превышающих номинальные) без увеличения капитальных затрат;
- энергоустановки на базе ВИЭ характеризуются низким уровнем эксплуатационных затрат с периодичностью технического обслуживания не чаще одного раза в год;

- современный уровень автоматизации энергоустановок на базе ВИЭ реально позволяет обеспечить их функционирование по безлюдной технологии с осуществлением полномасштабного дистанционного контроля за техническим состоянием всех элементов энергоустановки;
- высокий уровень экологичности энергоустановок на базе ВИЭ.

Наряду с достоинствами ВИЭ имеют и ряд существенных недостатков:

- относительно высокая стоимость энергоустановок на базе ВИЭ за счет стоимости некоторых комплектующих (например – стоимость аккумуляторных батарей для накопления энергии может достигать до 50-60% от стоимости и объема всей энергоустановки);
- значительная удельная площадь солнечных панелей (1 м<sup>2</sup> на 150-200 Вт), при этом наблюдается тенденция к улучшению показателя;
- зависимость выработки энергии от времени суток и сезонов года;
- длительный срок окупаемости (реальный срок окупаемости только «на тарифе» составляет 12-15 лет).

Анализ вышеприведенной информации позволяет сделать вывод, что ВИЭ может использоваться для электроснабжения удаленных и автономных объектов, однако требуется правильно выбрать конфигурацию энергоустановки для уменьшения удельной стоимости электроэнергии и минимизации фактора стохастического режима работы.

#### **IV. Анализ потенциала использования энергоустановки на базе ВИЭ в зависимости от района эксплуатации**

Для выбора комплектности энергоустановки необходимо проанализировать ветровой и солнечный потенциал места установки. Известно, что на территории РФ значительная часть регионов обладает достаточным ветровым или солнечным потенциалом для использования ВИЭ [3,4]. До 65% территории России характеризуется средним и высоким уровнем ветровой активности (рис. 1), в том числе:

- 45% территории со среднегодовой скоростью ветра 3,5-5,0 м/с;
- 20% территории со среднегодовой скоростью ветра более 5,0 м/с.

До 65% территории России характеризуется средним и высоким уровнем солнечной активности (рис. 2), в том числе:

- 40% территории с уровнем солнечной радиации 3,5-4,5 кВт.ч/м<sup>2</sup> в сутки;
- 25% территории с уровнем солнечной радиации более 4,5 кВт.ч/м<sup>2</sup> в сутки.

Если посмотреть на карты ветровой и солнечной активности России, то можно сделать следующие выводы:

- стабильная ветровая активность присутствует на побережье всех морей и в степных районах;



- стабильная солнечная активность (мало зависящая от времени года) имеется в южных районах страны и в Якутии;
- самым неперспективным для применения энергоустановок на базе ВИЭ считаются северо-западные районы России (не считая побережья Финского залива и Балтийского моря); здесь на относительно большое количество пасмурных и безветренных дней накладывается наличие централизованных электрических сетей, что склоняет «чашу весов» в пользу последних.



Рис. 1. Карта ветровой активности на территории РФ



Рис. 2. Карта солнечной активности на территории РФ

Наложение карт районов ветровой и солнечной активности показывает, что более 90% территории России имеет достаточный потенциал для использования возобновляемых источников энергии (рис. 3):

- практически идеальное сочетание ветровой и солнечной активности обеспечивается на побережье южных морей и в южных степях;
- хорошее сезонное сочетание ветровой и солнечной активности присутствует в районах северной тундры (летом – круглосуточный полярный день, зимой – ветра, метели, весной и осенью – дневная солнечная активность и ветра);
- в районах средней полосы имеется неплохой уровень солнечной активности в весенне-летний период и периодическая ветровая активность среднего уровня.



Рис. 3. Наложение карт районов ветровой и солнечной активности

Диаграммы сезонных и суточных периодов ветровой (рис. 4) и солнечной (рис. 5) активности показывают, что во многих случаях максимальная эффективность ВИЭ может достигаться при совместном использовании ветрогенераторов и солнечных модулей.

Анализ карт районов ветровой и солнечной активности, а также диаграмм сезонных и суточных периодов эффективности работы ветро-солнечных модулей позволил сделать следующие выводы.

1. Энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии без резервных топливо-потребляющих источников или внешней сети могут обеспечить категорию надежности электроснабжения потребителей не выше третьей с достаточно частыми и длительными перерывами питания.

2. В энергоустановках на базе ВИЭ без резервных источников потенциально присутствует вероятность преждевременной потери емкости аккумуляторов из-за продолжительных периодов неполного заряда.

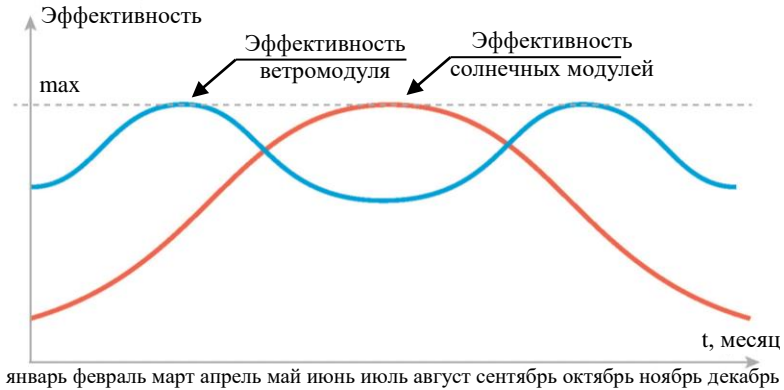


Рис. 4. Диаграмма сезонных периодов эффективности работы ветро-солнечных модулей в течение года (усреднено для средней полосы России)

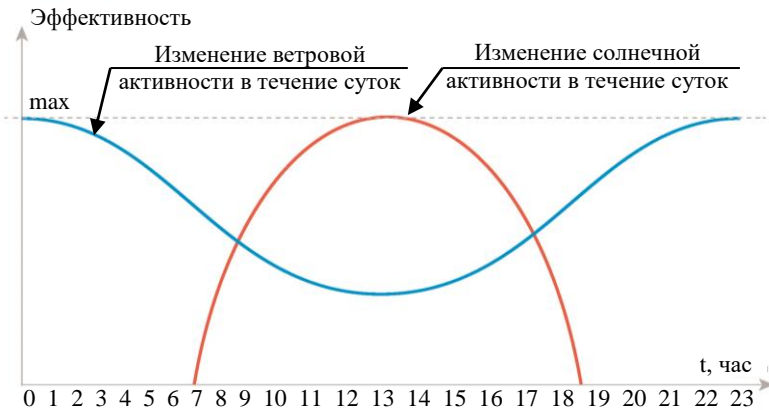


Рис. 5. Диаграмма периодов эффективности работы ветро-солнечных модулей в течение суток

3. Увеличение количества солнечных панелей, ветрогенераторов, емкости аккумуляторных батарей в составе энергоустановок значительно увеличивают капитальные затраты и срок окупаемости, но не повышает уровень надежности электроснабжения потребителей.

4. Автономные энергоустановки на базе ВИЭ (не имеющие силовой связи с внешней сетью) должны иметь в своем составе резервный

источник электроэнергии, независимый от ветровой и солнечной активности в месте размещения.

5. В составе автономных энергоустановок, возобновляемые источники энергии и резервный источник взаимно дополняют друг друга и обеспечивают оптимальный режим функционирования энергоустановки в целом, а именно:

- значительно повышается коэффициент использования и снижается расход топлива, т.к. время работы резервного (топливо-потребляющего) источника составляет не более 20% от общего времени работы энергоустановки;
- по этой же причине снижается общее количество выбросов и повышается экологичность энергоустановок на базе ВИЭ (по сравнению с энергоустановками на базе топливо-потребляющих источников);
- при использовании в качестве резервных источников дизель-генераторных и газопоршневых агрегатов, значительно улучшается показатель удельной стоимости на 1 кВт установленной мощности энергоустановки, так как стоимость этих резервных источников составляет не более 10% от общей стоимости изделия;
- при использовании резервных источников на базе термо-электрических генераторов (ТЭГ), значительно увеличивается КПД энергоустановки в целом, т. к. КПД базовых источников на базе ВИЭ в 4-5 раз выше, чем у ТЭГ (при этом частично снижается стоимость комбинированной энергоустановки по сравнению с энергоустановкой на базе ТЭГ).

6. Автономные энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии с резервными источниками обеспечивают уровень надежности электроснабжения потребителей на уровне первой категории, а при наличии комплекта ИБП – на уровне особой группы ОГ-1.

7. Учитывая значительный срок окупаемости энергоустановок на базе ВИЭ за счет экономии «на тарифе», решение о целесообразности применения таких энергоустановок необходимо принимать по результатам сравнения капитальных затрат на альтернативные варианты организации энергообеспечения объекта.

#### **V. Критерии выбора типа и производительности силового оборудования энергоустановок на базе ВИЭ**

Исходя из выводов предыдущего раздела, можно сформулировать основные критерии выбора элементов энергоустановок на базе ВИЭ.

Основные критерии выбора типа и производительности солнечных модулей:

- монокристаллические панели целесообразно применять в районе с преобладанием ясных солнечных дней;

- поликристаллические панели целесообразно применять в районах с преобладанием рассеянного солнечного света (высокая облачность);
- для районов с уровнем солнечной радиации  $2,5 - 3,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день производительность солнечного модуля следует выбирать из расчета  $4,0 - 4,5 \text{ кВт}$  на  $1 \text{ кВт}$  среднесуточной потребляемой мощности;
- для районов с уровнем солнечной радиации  $3,5 - 4,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день производительность солнечного модуля следует выбирать из расчета  $3,0 - 3,5 \text{ кВт}$  на  $1 \text{ кВт}$  среднесуточной потребляемой мощности;
- для районов с уровнем солнечной радиации более  $4,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в день производительность солнечного модуля следует выбирать из расчета  $2,0 - 2,5 \text{ кВт}$  на  $1 \text{ кВт}$  среднесуточной потребляемой мощности.

Основные критерии выбора типа и производительности ветрогенераторов:

- технические характеристики ветрогенераторов (горизонтально-осевые, вертикально-осевые, роторные) мало отличаются друг от друга. АО «НИПОМ» сделал выбор в пользу вертикально-осевых безредукторных ветрогенераторов из – за оптимального сочетания цены и надежности;
- использование ветрогенераторов в качестве базового источника целесообразно в районах со среднегодовой скоростью ветра от  $7,0 \text{ м/с}$  и более. Производительность ветрогенераторов для таких районов рекомендуется выбирать из расчета  $1,5 - 2,0 \text{ кВт}$  на  $1,0 \text{ кВт}$  среднесуточной потребляемой мощности;
- использование ветрогенераторов в районах со среднегодовой скоростью ветра  $4,0 - 7,0 \text{ м/с}$  целесообразно в качестве вспомогательного источника для дополнительной выработки энергии. Производительность ветрогенераторов для таких районов рекомендуется выбирать из расчета  $0,5 - 1,0 \text{ кВт}$  на  $1,0 \text{ кВт}$  среднесуточной потребляемой мощности;
- использование ветрогенераторов в районах со среднегодовой скоростью ветра менее  $4,0 \text{ м/с}$  нецелесообразно;
- при размещении ветрогенераторов необходимо учитывать наличие естественных или искусственных препятствий (горы, лес, здания и др.);
- оптимальная высота мачты для ветрогенераторов мощностью до  $10,0 \text{ кВт}$  – до  $18 - 20 \text{ м}$ .

Основные критерии выбора типа и емкости аккумуляторных батарей:

- учитывая циклический режим работы, для накопителей целесообразно применять литий-ионные аккумуляторные батарей с допустимой глубиной разряда  $80 - 90\%$ ;
- рекомендуемое напряжение АБ: =  $24 \text{ В}$  для среднесуточной нагрузки до  $1,0 \text{ кВт}$ ; =  $48 \text{ В}$  для среднесуточной нагрузки до  $2,5 \text{ кВт}$ ; =  $220 \text{ В}$  для среднесуточной нагрузки  $3,0 \text{ кВт}$  и более;

- эффективный запас энергии в накопителе (при допустимой глубине разряда АБ 80%) должен составлять 18-20 кВт·ч на 1,0 кВт среднесуточной потребляемой мощности.

Основные критерии выбора типа и мощности вспомогательных энергоисточников:

- как правило, в качестве вспомогательного источника энергии для энергоустановок на базе ВИЭ используют ДГА с соответствующим запасом топлива и межрегламентным периодом;
- при наличии источника централизованного газоснабжения, целесообразно применять газопоршневые или газовые микротурбинные агрегаты с соответствующим межрегламентным периодом;
- мощность вспомогательного источника должна определяться из расчета 2,2-2,5 кВт на 1,0 кВт среднесуточной потребляемой мощности.
- Основные критерии выбора типа и мощности инвертора:
- для энергоустановок на базе ВИЭ целесообразно применять модульные инверторы со степенью резервирования не менее  $N + 2$ ;
- рабочая мощность инвертора (без учета резервных модулей) должна соответствовать максимальным кратковременным пиковым нагрузкам, на которые рассчитывается энергоустановки на базе ВИЭ.

#### **VI. Экономические аспекты применения энергоустановок на базе ВИЭ**

Удельная стоимость промышленных энергоустановок на базе ВИЭ составляет в среднем около 3,0 млн рублей за 1,0 кВт среднесуточной мощности (в том числе 50-60% составляет стоимость накопителей). Стоимостные показатели энергоустановок на базе ВИЭ конкурируют с энергоустановками на базе ТЭГ, ЭХГ, турбоальтернаторов, СПДС. Реальный срок окупаемости вышеуказанных установок «на тарифе» составляет 12-15 лет.

Удельные показатели блочно-комплектных энергоустановок на базе традиционных источников (ДГА, ГПЭГ, микротурбин) составляют 0,5-1,0 млн руб. за 1,0 кВт номинальной мощности с учетом категории надежности энергоустановки, при сроке окупаемости «на тарифе» 4-5 лет. Сравнение стоимостей энергоустановок в диапазоне мощностей до 5,0 кВт показало, что энергоустановки на базе ВИЭ, ЭХГ, ТЭГ успешно конкурируют с энергоустановками на базе традиционных источников, при этом показатели технической эффективности и экологичности у энергоустановок на базе ВИЭ значительно выше. Сравнение показателей по «приведенным затратам» для энергоустановок мощностью до 5,0 кВт во многих случаях также склоняется в пользу энергоустановок на базе ВИЭ.

## VII. Заключение

На основании вышеизложенного энергоустановки на базе ВИЭ могут найти применение и эффективно использоваться для энергообеспечения целого ряда технологических и вспомогательных объектов:

- энергоустановки на базе ВИЭ мощностью до 1,0 кВт – энергообеспечение локальных станций геомониторинга, локальных систем контроля загазованности, систем антикоррозионного мониторинга, КПТМ на УЗПОУ, отдельно стоящих импульсных СКЗ, светоограждения опор ЛЭП, освещение вертолетных площадок;
- энергоустановки на базе ВИЭ мощностью 2,0-5,0 кВт – энергообеспечение линейных объектов магистральных и распределительных газопроводов (крановые узлы, КПТМ, СКЗ, объекты связи, КИТСО, УЗПОУ, небольшие ГРС) и отдельные газовые скважины;
- энергоустановки на базе ВИЭ мощностью 5,0-10,0 кВт – энергообеспечение ГРС, КРП, УРГ, УЗРГ, объектов связи, кустов газовых скважин.

АО «НИПОМ» с 2014 года ведет активную работу в области создания комплектных энергоустановок БКЭУ-ВСМ на базе ВИЭ, альтернативных и традиционных источников энергии.

Необходимо отметить, что в августе 2015 года в ООО «Газпром трансгаз Москва» на площадке КРП-16 была завершена опытно-промышленная эксплуатация и проведены приемочные испытания головного образца блочно-комплектной энергоустановки серии БКЭУ-ВСМ с резервным дизель-генераторным агрегатом и буферно-накопительной аккумуляторной батареей с запасом энергии 20 кВт·ч (рис. 6). По состоянию на конец октября 2016 года, выработка электроэнергии составила более 5 500 кВт·ч электроэнергии, что подтверждает возможность и целесообразность применения энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии даже в районах со средним уровнем ветровой и солнечной активности.

В настоящее время, специалистами ОАО «НИПОМ» разработаны и освоено производство целого ряда модификаций блочно-комплектных энергоустановок серии БКЭУ-ВСМ различного назначения.



Рис. 6. Головной образец контейнерной энергоустановки БКЭУ-ВСМ/ДГА на площадке КРП-16 в ООО «Газпром трансгаз Москва»

© Голубев С.В., 2018

### Библиографический список

- [1] О перспективах использования на объектах ПАО «Газпром» автономных энергоустановок отечественных производителей // Газовая промышленность. 2016. № 2 (734). С. 14-15.
- [2] Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
- [3] Солнечные ресурсы // ГИС ВИЭ [Электронный ресурс]. URL: <http://gisre.ru/maps/sun-radiation> (дата обращения 25.07.2018).
- [4] Ветровые ресурсы // ГИС ВИЭ [Электронный ресурс]. URL: <http://gisre.ru/maps/wind-data> (дата обращения 25.07.2018).
- [5] Методика оценки эффективности и выбора оптимальной модификации автономных энергетических установок серии БКЭУ-ВСМ производства ОАО «НИПОМ» на базе ветро-солнечных модулей, внутренний документ ОАО «НИПОМ», Дзержинск, 2015. С. 6-11.
- [6] Программа расчета необходимой производительности ветрогенераторных установок и солнечных модулей для выбора оптимальной комплектации ветро-солнечных энергоустановок компании «Фабрика тока» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fabrikatoka.ru/pages/sun.php/> (дата обращения 29.07.2018).



**S.V. Golubev**

## **TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF CHOOSING POWER PLANTS BASED ON RES**

Joint Stock Company «Scientific and Research Company  
of General Machine-Building», Dzerzhinsk, Russia

**Abstract.** Improving the efficiency of use in autonomous electrical systems and power plant systems based on renewable energy sources (RES) is an important direction in the development of modern power industry in Russia. The article is devoted to the issues of cost optimization when choosing RES for energy supply of autonomous objects. The analysis of the advantages and disadvantages of the use of power plants based on RES, taking into account the peculiarities of the Russian power industry is performed. It has been established that optimization of the configuration of power plants is required in order to reduce the specific cost of electricity to ensure the effective use of RES. A review and systematized the results of many years of research into the potential of wind and solar energy in the territory of the Russian Federation are made. Areas of Russia promising for the use of renewable energy are identified. Based on the obtained results, the main criteria for selecting the optimal configuration of power plants based on RES are formulated. The economic aspects of the use of RES are considered and examples of their successful implementation in autonomous power supply systems are given.

**Key words:** autonomous power supply systems, renewable energy sources, selection criteria, solar power station, wind power plant.

### **References**

- [1] «On the prospects for the use of autonomous power plants of domestic producers at the facilities of PJSC Gazprom», Gas industry, vol. 734, no. 2, pp. 14-15, 2016.
- [2] Federal Law as of November 23, 2009 No. 261-FZ (revised on July 13, 2015) «On energy saving and improvement of energy efficiency and on making amendments to certain legislative acts of the Russian Federation».
- [3] Sun radiation. [Online]. Available at: <http://gisre.ru/maps/sun-radiation> [Accessed: July 25, 2018].
- [4] Wind data [Online]. Available at: <http://gisre.ru/maps/wind-data> [Accessed: July 25, 2018].
- [5] Method for assessing the efficiency and selecting optimal configuration of autonomous power supply plants of series BKEU – VSM (Modular Packaged Power Supply Plants Powered by Wind and Solar Modules) manufactured by NIPOM, JSC powered by wind and solar modules, NIPOM, JSC's internal document, Dzerzhinsk, 2015, pp. 6-11.
- [6] Program for calculating the required capacity of wind power generator plants and solar modules to select the best configuration of wind and solar power supply plants of Fabrika Toka company. [Online]. Available at: <http://www.fabrikatoka.ru/pages/sun.php/>. [Accessed: July 29, 2018].

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК.621.3

А.Н. Кузменков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов, А.В. Шахов

### РАСЧЕТ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Современным направлением повышения эффективности электротехнических комплексов, в состав которых входят электродвигатели, является применение принципиально нового вида подшипников – электромагнитных (ЭМП). Широкому распространению ЭМП препятствует их высокая стоимость, напрямую связанная с трудностями технической реализации. При этом важное значение имеет система автоматического управления. Статья посвящена исследованию контуров регулирования ЭМП. Выполнен анализ принципов построения систем управления ЭМП, отмечены достоинства и недостатки одноконтурных и многоконтурных систем управления. Для трехконтурной системы управления приведены кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока, а также построены диаграммы переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействию. Установлено, что ЭМП, оснащенные трехконтурной системой управления с релейным регулятором тока обладают высоким быстродействием, но в то же время имеют малую статическую жесткость.

**Ключевые слова:** переходные процессы, регулирование тока, система управления, электродвигатель, электромагнитный подшипник.

Важным элементом многих энергетических машин является ротор, который вращается в подшипниковых опорах. Рост скоростей вращения и необходимость снижения потерь мощных роторных машин делают актуальной задачу разработки принципиально нового вида подшипников, в которых для создания опорных реакций используются магнитные и электрические поля. Среди них наибольший практический интерес представляют электромагнитные подшипники (ЭМП). Применение ЭМП в конструкции мощных электродвигателей позволяет увеличить срок службы и расширить эксплуатационные возможности создаваемых агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества ЭМП, данный вид подшипников не получает широкого применения в силу определенных причин. Основной проблемой является сложность технической реализации ЭМП, с чем связана их высокая стоимость. Сложность и стоимость во многом зависят от технической реализации системы автоматического управления (САУ), без которой данный вид опор не может функционировать в принципе.

Для структурного и параметрического синтеза САУ используется математическая модель одной оси ЭМП [1]:

$$\begin{cases} U_1 = L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + R_1 \cdot I_1 + k_{E1} \cdot \frac{dy}{dt}; \\ U_3 = L_3 \cdot \frac{dI_3}{dt} + R_3 \cdot I_3 + k_{E3} \cdot \frac{dy}{dt}; \\ m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{эм} \cdot \frac{I_1}{I_1 + I_3} + k_F \cdot y - G \pm F_B, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_1, U_3$  – напряжение питания обмоток электромагнитов, В;  $I_1, I_3$  – ток питания обмоток электромагнитов, А;  $L_1, L_3$  – индуктивность обмоток электромагнитов, Гн;  $R_1, R_3$  – активное сопротивление обмоток электромагнитов, Ом;  $k_{E1}, k_{E3}$  – коэффициенты ЭДС, В·с/м;  $y$  – возможное перемещение ротора в поле электромагнитов, м;  $m$  – масса ротора, приходящаяся на одну ось подшипника, кг;  $k_{эм}$  – коэффициент электромагнитной силы, Н/А;  $k_F$  – коэффициент, связывающий приращение электромагнитного усилия и смещение ротора (коэффициент положительной обратной связи по перемещению), Н/м;  $G$  – вес ротора, вращающегося в поле электромагнитов, Н;  $F_B$  – равнодействующая внешних сил, действующих на ротор, Н (те же самые обозначения используются и далее, в том числе и в рисунках).

В общем случае при создании систем управления электромагнитным подвесом ротора целью является обеспечение высокого быстродействия, точности поддержания ротора машины в центральном положении, демпфирование возможных вибраций. Сложность современных систем управления ЭМП обусловлена применяемыми при их синтезе методами. Можно выделить несколько принципов построения систем управления ЭМП:

- одноконтурные системы управления, синтезированные методом решения обратных задач динамики;
- двухконтурные и трехконтурные системы управления, построенные по принципу подчиненного регулирования координат.

На рис. 1 представлена структурная схема трехконтурной системы управления [2]. Настройка системы производится путем последовательной оптимизации контуров регулирования. Однако данный подход требует выделения в объекте управления ряда координат (скорость, перемещение, ток), по которым будут замкнуты соответствующие контуры регулирования. Система управления, синтезируемая по такому принципу, характеризуется простотой технической реализации (средствами как аналоговой, так и микропроцессорной техники) и простотой ограничения регулируемых координат (скорость, перемещение, ток). В качестве датчика главной обратной связи используется бесконтактный датчик, измеряющий перемещение ротора в поле электромагнитов. Коэффициент передачи датчика  $k_{д.п.}$ , В/м, выбран таким образом, чтобы при максимально возможном смещении ротора  $y = 0,2$  мм сигнал датчика был равен 10 В. Для выделения сигнала обратной связи по скорости перемещения сигнал датчика положения ротора дифференцируется и вводится в систему с коэффициентом передачи  $k_{осс}$ , В/с<sup>-1</sup> [3].

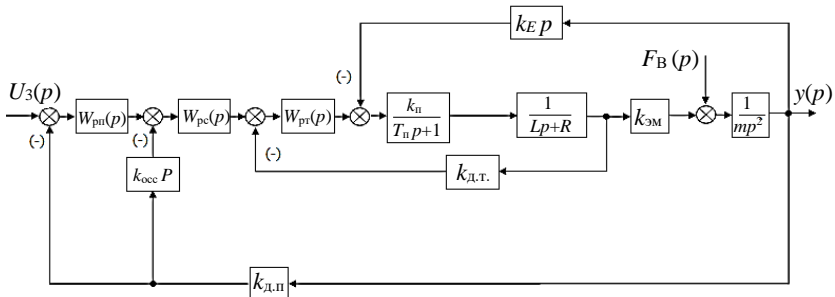


Рис. 1. Структурная схема трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

где  $U_3$  – напряжение задания на входе регулятора, В;  $W_{р.п.}$ ,  $W_{р.с.}$ ,  $W_{р.т.}$  – передаточные функции регуляторов положения, скорости, тока;  $k_{д.т.}$  – коэффициент передачи датчика тока;  $k_{д.п.}$  – коэффициент передачи датчика положения;  $k_{осс}$  – коэффициент передачи датчика скорости.

В разомкнутом состоянии система является неустойчивой. Введение внутреннего контура тока позволяет снизить чувствительность синтезируемой системы к внешним возмущениям, а также увеличить быстродействие системы за счёт более быстрого протекания переходных процессов. Следует отметить, что постоянная времени внутреннего контура тока достаточно велика (~50 мс), что приводит к необходимости большой форсировки по источнику питания [4]. Принимая во внимание, что регулирование тока в электромагнитном подшипнике обеспечивается широтно-

импульсным регулятором, представляет особый интерес рассмотреть объект управления как импульсный. Импульсная система управления может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части (рис. 2). Импульсный элемент можно представить как последовательное соединение идеального элемента  $T$  и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией  $H(s)$  [5].

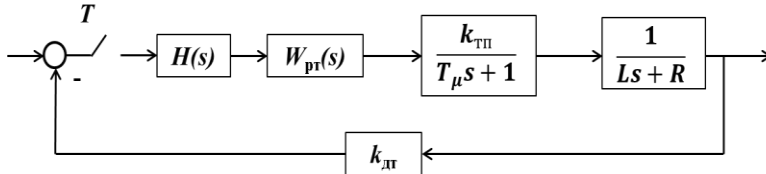


Рис. 2. Структурная схема замкнутой импульсной системы контура тока

Наиболее простым и распространенным методом расчета импульсных систем является метод z-преобразования [6]. Представлены расчетные значения изменения тока электромагнита газового нагнетателя мощностью 16 мВт, полученные при моделировании в импульсной системе построения контура тока.

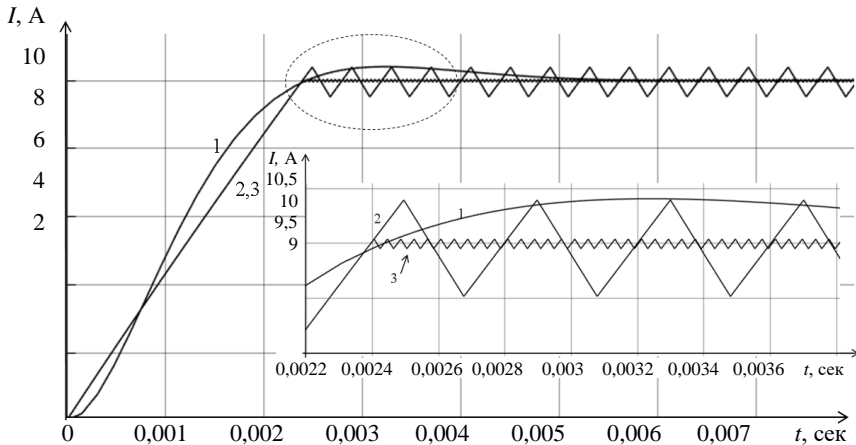


Рис. 3. Кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока:

- 1 – с ПИ регулятором; 2 – с релейным регулятором;  
3 – с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме

С ПИ регулятором (рис. 3, кривая 1) контур тока является астатическим как по заданию, так и по возмущению. Перерегулирование при опти-

мизации на модульный оптимум составляет 4,3 %. Релейный регулятор (рис. 3, кривая 2) обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно ярко выраженный колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания и шириной петли гистерезиса регулятора. Повысить качество регулирования, т.е. снизить амплитуду и поднять частоту автоколебаний, позволяет применение релейного регулятора, работающего в скользящем режиме (рис. 3, кривая 3). Скользящий режим реализуется в релейных системах, введением внутренней обратной связи, охватывающей релейный элемент. На практике всегда реализуется режим близкий к скользящему, ограничение связано с конечной частотой переключения релейного элемента. Реальный релейный элемент не может переключаться с бесконечной частотой вне зависимости от способа его реализации: аппаратной (реле), электронной (электронная схема) или программной (микропроцессорное устройство).

Практическое преимущество многоконтурных систем управления заключается в том, что настройка контуров регулирования осуществляется независимо и последовательно. Следующим этапом после настройки внутреннего контура тока, является построение трехконтурной импульсной системы управления, структура которой представлена на рис. 4.

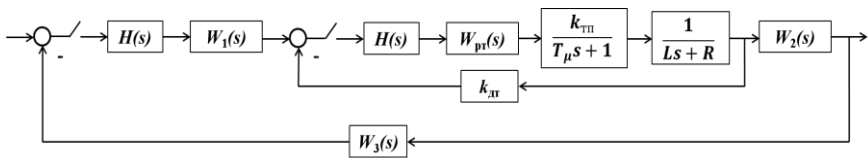


Рис. 4. Структурная схема трехконтурной системы управления с импульсным элементом

При выбранных параметрах электромагнитов, преобразователя и регуляторов переходный процесс перемещения ротора в поле электромагнитов будет иметь вид, представленный на рис. 5 [7]. В рассматриваемой системе практически отсутствует перерегулирование, выходная координата у максимально приблизилась к заданному значению  $y_{уст}$  (рис. 5), при этом время переходного процесса составляет  $t_{пт} = 0,0065$  с. Изменение режима работы системы возникает в результате прикладываемого к ней внешнего воздействия. Внешнее возмущение в виде скачкообразной нагрузки наиболее характерно для систем стабилизации. Следует отметить, что основными силами, действующими на ЭМП, являются центробежные силы от неуравновешенности ротора [8]. Анализ зависимостей отклонения ротора показал, что максимально допустимое

значение несбалансированной массы составляет 8,6 % при скорости вращения ротора  $n = 6000$  об/мин. Произведена оценка устойчивости системы, при обработке возмущающего воздействия  $F_B = 20000$  Н, соответствующего значению несбалансированной массы 1% от массы ротора (рис. 6).

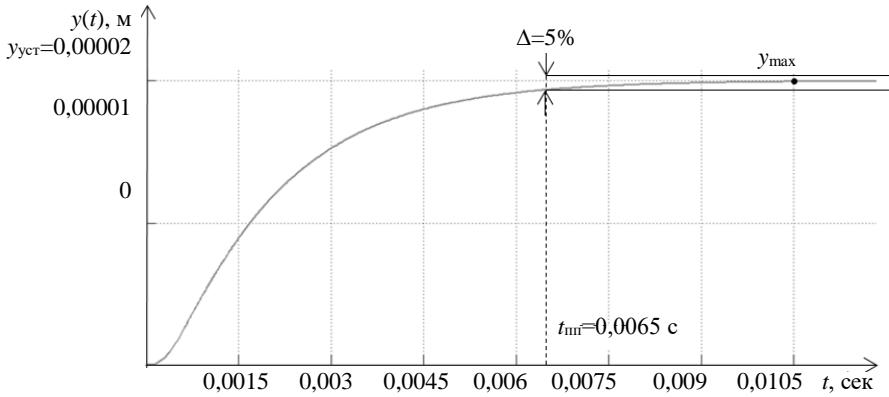


Рис. 5. Переходный процесс по управляющему воздействию при единичном задании

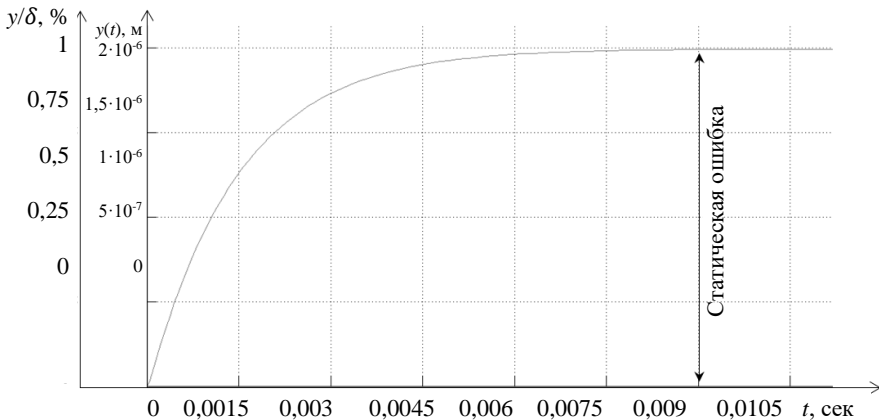


Рис. 6. Переходный процесс по возмущающему воздействию

Анализ результатов моделирования показывает, что электромагнитные подшипники, оснащенные трехконтурной системой управления с релейным регулятором тока, обладают высоким быстродействием, но в то же время имеют малую статическую жесткость (рис. 6). Время переходного процесса составило  $t_{\text{пн}} = 0,0065$  с, статическая ошибка регулирования 1%, т.е. при внешнем воздействии ротор отклоняется от центрального положения на величину, составляющую 1% допустимого зазора  $\delta$ . Это позволяет использовать подобные системы в установках, где необходимо высокое быстродействие, а не максимальная жесткость и нагрузочная способность. При смещении вала в одном из направлений в соответствующей катушке возбуждается ток, создающий магнитную силу, стремящуюся возвратить вал в центральное положение.

© Кузменков А.Н., 2018

© Мирясов Г.М., 2018

© Титов В.Г., 2018

© Шахов А.В., 2018

#### Библиографический список

- [1] Сарычев А.П., Руковицын И.Г. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками // Вопросы Электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2008. Т. 107. С. 11-15.
- [2] Кузменков А.Н., Титов В.Г., Шахов А.В. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 4. С. 14-23.
- [3] Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2007. № 1 (14). С. 143-148.
- [4] Наумец А.Е., Таганов Р.С., Мирясов Г.М., Титов В.Г. Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 298-302.
- [5] Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
- [6] Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2007. № 2 (15). С. 186-188.
- [7] Титов В.Г., Кузменков А.Н., Шахов А.В. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником // Инженерный вестник Дона, 2015. № 3 (37). С. 26.



- [8] Абдуррагимов А.С., Носков А.В., Сарычев А.П. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Труды 15 Международного симпозиума «Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования», СПб. 2010. – С. 128.

**A.N. Kuzmenkov, G.M. Miryasov, V.G. Titov, A.V. Shakhov**

## **CALCULATION OF ADJUSTMENT CIRCUITS OF ELECTROMAGNETIC BEARING**

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

**Abstract.** The modern direction of improving the efficiency of electrical systems, which include electric motors, is the use of a fundamentally new type of bearings – electromagnetic bearings (EMF). The EMF widespread is hampered by their high cost, directly related to the difficulties of technical implementation. At the same time, the automatic control system is important. The article is devoted to the study of the regulation contours of EMF. The analysis of the principles of building EMF control systems is performed. The advantages and disadvantages of single-loop and multi-loop control systems are noted. Current transient curves are given for a three-loop control system for various types of current regulators, and transient diagrams for control and perturbing effects are plotted. It is established that EMFs equipped with a three-circuit control system with a relay current regulator have high speed, but at the same time have low static rigidity.

**Keywords:** current control, control system, electric motor, electromagnetic bearing, transients.

### **References**

- [1] A.P. Sarychev and Rukovitsyn I.G., «Rotor mathematical model for magnetic bearings control analysis», Electromechanical matters. VNIEM studies, vol. 107, pp. 11-15, 2008.
- [2] A.N. Kuzmenkov, V.G. Titov and A.V. Shakhov, «Development and modeling of the three-element system of control of electromagnetic bearing», Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics, vol. 4, pp. 14-23, 2015.
- [3] Yu.A. Makarichev, A.V. Starikov and I.S. Tkachenko, «Synthesis of a system for secondary control of a rotor with an electromagnetic bearing», Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences, vol. 1, no. 14, pp. 143-148, 2007.
- [4] A.E. Naumets, R.S. Taganov, G.M. Miryasov, V.G. Titov, «Optimization of current control circuit of electromagnetic bearing», Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 5, no. 102, pp. 298-302, 2013.

- [5] Yu.N. Zhuravlev, Active magnetic bearings: theory, calculation, application. St. Petersburg: Polytechnic, 2003.
- [6] Yu.A. Makarichev, A.V. Starikov and I.S. Tkachenko, «Discrete mathematical model of digital control system for electromagnetic suspension of rotor», Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences, vol. 2, no. 15, pp. 186-188, 2007.
- [7] V.G. Titov, A.N. Kuzmenkov and A.V. Shakhov, «Design and modeling of three-loop control system of an electromagnetic bearing», Engineering journal of Don, vol. 3, no. 37, p. 26, 2015.
- [8] A.S. Abduragimov, A.V. Noskov and A.P. Sarychev, «Experience of using magnetic bearings in GPU compressors», in proc. 15th International Symposium «Consumers manufacturers of compressors and compressor equipment», St. Petersburg, 2010, p. 128.

## НАШИ АВТОРЫ

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**Лыонг Ван Чынг** – младший научный сотрудник Байкальского института «БРИКС» Иркутского национального исследовательского технического университета; [chungnv@mail.ru](mailto:chungnv@mail.ru)

**Герман Леонид Абрамович** – профессор Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, доктор технических наук, профессор; [lagerman@mail.ru](mailto:lagerman@mail.ru)

**Голубев Сергей Васильевич** – заместитель генерального директора АО «НИПОМ», кандидат технических наук; [s.golubev@nipom.ru](mailto:s.golubev@nipom.ru)

**Дарьенков Андрей Борисович** – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук, доцент; [darenkov@nntu.ru](mailto:darenkov@nntu.ru)

**Директор Леонид Бенцианович** – ведущий научный сотрудник лаборатории распределенной генерации Объединенного института высоких температур РАН, доктор технических наук; [director@oivtran.ru](mailto:director@oivtran.ru)

**Иванин Олег Александрович** – младший научный сотрудник лаборатории распределенной генерации Объединенного института высоких температур РАН; [oleggin2006@yandex.ru](mailto:oleggin2006@yandex.ru)

**Калинин Евгений Владимирович** – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; [Chernmaza@yandex.ru](mailto:Chernmaza@yandex.ru)

**Кобяков Дмитрий Сергеевич** – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; [epa-guitar@mail.ru](mailto:epa-guitar@mail.ru)

**Коверникова Лидия Ивановна** – старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, кандидат технических наук; [kovernikova@isem.irk.ru](mailto:kovernikova@isem.irk.ru)

**Кшталтный Николай Иванович** – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; [epa-guitar@mail.ru](mailto:epa-guitar@mail.ru)

**Мамонов Андрей Михайлович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук, доцент; [mam800@mail.ru](mailto:mam800@mail.ru)

**Нго Ван Кыонг** – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета; [ngovancuongmta@gmail.com](mailto:ngovancuongmta@gmail.com)

**Осокин Владимир Леонидович** – заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, кандидат технических наук, доцент; [osokinvl@mail.ru](mailto:osokinvl@mail.ru)

**Попель Олег Сергеевич** – главный научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН, доктор технических наук, доцент; [o\\_popel@oivtran.ru](mailto:o_popel@oivtran.ru)

**Серебряков Александр Сергеевич** – профессор Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, доктор технических наук; [serebryakov@ardman.ru](mailto:serebryakov@ardman.ru)

**Солнцев Евгений Борисович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук, доцент; [sol10001@mail.ru](mailto:sol10001@mail.ru)

**Тарасенко Алексей Борисович** – старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН; [a.b.tarasenko@gmail.com](mailto:a.b.tarasenko@gmail.com)

**Федотов Антон Андреевич** – магистрант Московского энергетического института

**Фитасов Анатолий Николаевич** – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; [t7ce@yandex.ru](mailto:t7ce@yandex.ru)

**Фрид Семен Ефимович** – заведующий лабораторией Объединенного института высоких температур РАН, кандидат технических наук; [s\\_frid@oivtran.ru](mailto:s_frid@oivtran.ru)

**Хватов Олег Станиславович** – заведующий кафедрой Волжского государственного университета водного транспорта, доктор технических наук, профессор; [khvatov\\_oleg@mail.ru](mailto:khvatov_oleg@mail.ru)

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

**Юрлов Михаил Евгеньевич** – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; [misha-stalker@mail.ru](mailto:misha-stalker@mail.ru)

**Якупов Айнур Махмутович** – аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета; [aunurpov@mail.ru](mailto:aunurpov@mail.ru)

## **СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

**Кузменков Александр Николаевич** – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; [kuzmenkov-aleksandr@bk.ru](mailto:kuzmenkov-aleksandr@bk.ru)

**Мирясов Георгий Михайлович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; [eos@nntu.ru](mailto:eos@nntu.ru)

**Титов Владимир Георгиевич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук, профессор; [fae\\_nir@nntu.ru](mailto:fae_nir@nntu.ru)

**Шахов Андрей Валентинович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук, [era130@nntu.ru](mailto:era130@nntu.ru)

**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 2018**

**Smart electrical engineering** / NSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2018. № 3. – 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 Nizhny Novgorod branch of RUT
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 FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexander 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>

© Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2018

---

**CONTENT**

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS.....</b>	<b>4</b>
<b>Popel O.S., Tarasenko A.B., Fedotov A.A., Frid S.E.</b> Electric energy hybrid storage module for engine cold cranking – physical simulation....	4
<b>Kovernikova L.I., Van Ching Liong</b> Features of harmonic mode parameters in connection point of pulp and paper mill to electrical network.....	15
<b>Ivanin O.A., Director L.B.</b> Assessment of efficiency of gas – turbine – based electrical supply system for rural settlement.....	34
<b>Yakupov A.M.</b> Method of short – term forecasting of solar power plants production.....	44
<b>Khvatov O.S., Dar’enkov A.B., Kobaykov D.S., Kshtaltny N.I., Yurlov M.E.</b> Modeling of transitional processes diesel – generator installations of constant and variable rotation frequency in parallel operation.....	54
<b>Serebryakov A.S., German L.A., Osokin V.L.</b> Determination of equivalent circuit parameters for short currents calculation with two way supply of consumers.....	63
<b>Solncev E.B., Mamonov A.M., Fitasov A.N.</b> Analytical model for investigation of effect of distributed generation on quality of electric energy-voltage fluctuation .....	74
<b>Kalinin E.V., Chivenkov A.I.</b> Forecasting the increase of losses in joints of power transformers core.....	87
<b>Golubev S.V.</b> Technical and economic aspects of choosing power plants based on RES.....	102
<b>POWER ENGINEERING.....</b>	<b>114</b>
<b>Kuzmenkov A.N., Miryasov G.M., Titov V.G., Shakhov A.V.</b> Calculation of adjustment circuits of electromagnetic bearing.....	114
<b>Authors.....</b>	<b>123</b>

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
trenklen@nttu.ru

Подписано в печать 14.09.2018. Дата выхода в свет:

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

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,0. 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.