

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

---

***ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ***

---

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

***СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ***

Нижний Новгород 2021

**УДК 550.534.524**  
**А 437**

**А 437 Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф./**  
Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. –  
435 с.

Изложены проблемные вопросы современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, а также эффективности систем электроэнергетики.

Содержит научно-технические результаты и разработки регионального центра развития распределенной энергетики на основе возобновляемых источников энергии НГТУ и предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборник включены материалы VII Всероссийской (XL Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». Конференция проведена в рамках Программы развития опорного университета.

#### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

доц. **А.Б. Дарьенков** (отв. редактор), проф. **А.Б. Лоскутов**,  
проф. **В.Г. Титов**, проф. **А.И. Чивенков**,  
доц. **Е.В. Бычков**, доц. **А.А. Кралин**, доц. **А.А. Севостьянов**,  
доц. **Е.В. Крюков**

**УДК 550.534.524**

**ISBN 978-5-502-01482-3**

**© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2021**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>6</b>
<b>Гусаков Д. В.</b> Прогнозирование технического состояния энергетических преобразователей летательных аппаратов .....	6
<b>Кечкин А.О., Плехов А.С.</b> Устройство измерения электрических параметров для преобразователей малой и средней мощности .....	14
<b>Кузьменко Р.Ю., Таболин И.И.</b> Аппаратно-программный модуль формирования сигналов управления и теометрии для имитационного моделирования параметров аккумуляторной батареи.....	20
<b>Рогинская Л.Э., Ялалова З.И., Рахманова Ю.В., Горбунов А.С.</b> Особенности конструкции высоковольтного трансформатора для фильтров очистки воздуха...	26
<b>Рожков В.В., Федотов В.В.</b> Гармонический анализ фазных и линейных напряжений многоуровневых автономных инверторов напряжения с различным числом уровней для электропривода и электрэнергетики.....	33
<b>Садовский Н.А., Вихорев Н.Н., Алешин Д.А.</b> Исследование влияния величины нагрузки на коммутационные процессы в квазирезонансном инверторе напряжения.....	40
<b>Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С.</b> Применения эталонного сигнала для построения адаптивных систем управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии.....	46
<b>Трунов Д.С., Вихорев Н.Н., Трофимов И.М.</b> Двухнаправленный обратногоходовой преобразователь для систем накопления энергии.....	54
<b>Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....</b>	<b>60</b>
<b>Абузьяров Т.Х., Плехов А.С.</b> Алгоритм широтно-импульсной модуляции двойной инверторной системы для шагового электропривода.....	60
<b>Алейников А.В., Голубев А.Н.</b> Разработка алгоритма управления, уменьшающего вибрации многофазного синхронного электродвигателя.....	69
<b>Бердников И.Е., Дарьенков А.Б., Горбунов С.Н., Сажин М.А., Служов А.П., Соколов В.В.</b> Оценка возможности прямого пуска короткозамкнутых асинхронных двигателей от сети ограниченной мощности.....	76
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Ермолаев А.И., Макарьев А.А., Осмехин А.Н.</b> Вибрационная диагностика бумагоделательной машины №8 на бумкомбинате «Волга» (г. Балахна).....	83
<b>Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С.</b> Разработка способа снижения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей .....	95
<b>Лавриненко В.А., Николаев Д.В.</b> Разработка электропривода центробежного насоса с конденсаторным асинхронным двигателем.....	106
<b>Серебряков А.В., Стеклов А.С., Кочеганов Д.М.</b> Критерии оценки сложности ремонта судовых энергетических установок.....	114
<b>Слядзевская К.П.</b> Оптимизация контура скорости по критерию минимального времени переходного процесса электропривода по схеме «ШИП – ДПТ НВ».....	122
<b>Слядзевская К.П.</b> Оптимизация контура тока по критерию минимизации суммарной квадратичной ошибки электропривода по схеме «ШИП – ДПТ НВ».....	128
<b>Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Кудряшов Д.А.</b> Модель движения привода в режиме опускания регулирующего органа под действием собственного веса.....	134

<b>Чепига А.А., Корытченкова Е.Е., Анучин А.С.</b> Увеличение динамических показателей синхронного реактивного двигателя.....	143
<b>Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b> .....	151
<b>Барышников Д.А., Жуков В.В.</b> Влияние устройств интеллектуальных сетей на токи короткого замыкания систем электроснабжения .....	151
<b>Баязитов И.Р., Галимзянов Р.Р., Медведев В.Г., Петров М.И.</b> Некоторые вопросы расчетов реакторов дугогашения с немагнитными зазорами в сердечнике магнитопровода.....	158
<b>Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Ларин О.М.</b> Выявление источника фликера в системах электроснабжения.....	166
<b>Булин М.Н., Тарасевич Д.Д.</b> Мини-сети, микросети и активные энергетические комплексы: будущее энергосистемы.....	172
<b>Буякова Н. В., Крюков А. В., Середкин Д. А.</b> Электромагнитные поля в местах пересечения воздушных и кабельных линий.....	180
<b>Варга А.А., Шведов Г.В.</b> Влияние загрузки трансформаторов на потери электроэнергии в сети 6-10 кВ.....	186
<b>Карпов И.П.</b> Устройство управления АПВ выключателя питающей линии контактной сети переменного тока.....	193
<b>Кралин А.А., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В.</b> Исследование влияния тиристорного регулятора напряжения на изменение потоков мощности в распределительных электрических сетях.....	199
<b>Крюков А. В., Середкин Д. А., Фесак И. А.</b> Качество электроэнергии в перспективных системах электроснабжения магистральных железных дорог .....	206
<b>Липужин И.А.</b> Тестовые схемы IEEE и СИГРЭ для исследований систем электроэнергетики .....	213
<b>Лоскутов А.А., Шальнов Ю.С.</b> Исследование устойчивости энергетической системы 110 кВ с использованием малогабаритных устройств продольной компенсации для воздушных ЛЭП.....	223
<b>Лоскутов А.Б., Панкова А.С., Пронина О.А.</b> Разработка алгоритма функционирования системы адаптивной релейной защиты гексагональной распределительной электрической сети.....	238
<b>Любченко И. А.</b> Повышение качества электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.....	255
<b>Малеев А.В., Пантелеев В.И.</b> Применение программного комплекса Matlab для автоматизации расчетов стрелы провеса проводов воздушных линий электропередачи .....	262
<b>Ползиков М.Н., Исаев А.С.</b> Систематизация информационной базы менеджмента электрохозяйства промышленного предприятия .....	268
<b>Семенова Н.Г., Игнатьев Н.А.</b> Автоматизация процесса кластеризации систем электроснабжения предприятий по значению коэффициента роста нагрузки .....	274
<b>Соснина Е.Н., Петрицкий С.А., Юртаев С.Н., Мамонов А.М., Фитасов А.Н.</b> Исследование влияния твердотельных регуляторов напряжения на показатели качества электроэнергии.....	280
<b>Фурсанов М.И., Сазонов П.А., Дашковский А.А.</b> Механизм расчета и динамического мониторинга нагрузки в электрической сети.....	286
<b>Хусаинов А.Р., Семенова Н.Г.</b> Электроснабжение железных дорог, пути повышения качества электроэнергии.....	292



<b>Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>299</b>
<b>Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Исса Х. А., Якимович Б.А.</b> Моделирование и управление системой ветроэнергетики, связанной с сетью с использованием синхронного генератора с постоянными магнитами (СПМ).....	299
<b>Али К.А., Абдали Л. М., Мохаммед Х.Д., Исса Х.А., Коровкин Н.В.</b> Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы .....	309
<b>Аль-Руфай Ф. М., Кувшинов В. В., Абдали Л. М., Мохаммед Х. Д.</b> Разработка комбинированных автономных систем электроснабжения малой мощности с солнечной энергией для производства электроэнергии в сельский районах.....	318
<b>Боровинский Д.И.</b> Анализ электроэнергетических и газовых систем.....	326
<b>Гецман Е.М., Попкова Н.А.</b> Применение систем накопления энергии в энергосистеме Республики Беларусь.....	331
<b>Гусев О.Ю., Гусев Ю.П., Южанин А.Е.</b> Феррорезонансные процессы, вызванные однофазными замыканиями на землю, в распределительных сетях с компенсированной нейтралью .....	337
<b>Исмятуллин Р.Г., Бунаков Д.О., Шкляев И.В.</b> Инновационные подходы к повышению эффективности электроснабжения войск за счет солнечных батарей...	346
<b>Корнеев А.П.</b> Анализ перспектив развития возобновляемой энергетики в России.	353
<b>Малькова Я.Ю., Уфа Р.А.</b> Проведение оптимизации режима работы электроэнергетической системы.....	361
<b>Попкова Н.А., Гецман Е.М.</b> Анализ факторов, влияющих на возможность внедрения ветроэнергетических установок в электроэнергетическую систему Республики Беларусь .....	367
<b>Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р.</b> Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем.....	373
<b>Сидорова В.Т.</b> Методика размещения устройств распределённой генерации на основе ВИЭ.....	379
<b>Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е., Шароватов Р.А.</b> Методика выбора установленной мощности ТОВЭ в составе комбинированного источника электроснабжения животноводческого предприятия.....	386
<b>Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Эрдили Н.И., Власов А.С.</b> Вопросы управления энергообменом в виртуальной электростанции с распределенной генерацией....	400
<b>Тремясов В.А., Зограф Я.Е.</b> Модель надежности аккумуляторной батареи в системе генерации с возобновляемыми источниками энергии.....	415
<b>Цыденов Е. А., Прохоров А. В.</b> Повышение эффективности системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности в энергосистемах с большой долей возобновляемых источников энергии .....	421
<b>Шалухо А.В., Ворошилов А.А., Шувалова Ю.Н.</b> Вопросы применения технологий «больших данных» для выбора оптимальных параметров источников распределенной генерации.....	428

---

---

## Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

---

УДК 621.3.048.1

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_6

**Д.В. Гусаков**

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены и проанализированы процессы старения изоляции токопроводящих частей энергетического преобразователя. Приведен обзор существующих методик оценки старения изоляции. Представлены основные зависимости, с помощью которых можно определить срок службы энергетических преобразователей, и описан критерий окончания срока службы для общей изоляции.

**Ключевые слова:** прогнозирование, энергетические преобразователи, старение изоляции, ускоренные испытания.

В летательных аппаратах применяется множество различных энергетических преобразователей (ЭП), служащих для преобразования электрической энергии и передачи мощности от источника к потребителю. Каждое изделие проектируется и изготавливается под определенный назначенный ресурс, указанный в техническом задании или технических условиях, а также определенный в результате оценочных испытаний. Согласно регламенту технического обслуживания авиационной техники, изделие, отработавшее свой назначенный ресурс, подлежит замене без каких-либо испытаний на дальнейшее применение. В данном случае существует противоречие между установленным ресурсом энергетических преобразователей и их реальными эксплуатационными возможностями, которые зависят как от конструктивных, так и от полетных условий борта. Таким образом, реальные эксплуатационные характеристики изделий позволяют их дальнейшую эксплуатацию, в ряде случаев - до половины установленного жизненного цикла изделия.

ЭП летательных аппаратов (трансформаторно-выпрямительные устройства, трансформаторы, дроссели, уравнивательные реакторы) проектируются, основываясь на том факте, что у их обмотки, как у самого слабого звена изделия, имеется ограниченный ресурс работы. Количество отказов, приходящихся на

долю обмоток ЭП, в процентном соотношении составляет порядка 95 %. В связи с этим, ЭП имеют заданный ресурс эксплуатации (который указывается в техническом задании или технических условиях на изделие, согласно регламенту), по истечении которого изделие заменяется без какого-либо анализа соответствия износа и возможностей продолжительности их работы. Запас работоспособности по мере использования изделия уменьшается и завершается переходом в предельное состояние, после чего эксплуатация прекращается или прерывается до восстановления в процессе ремонта [1]. Нарботку электротехнического изделия от рассматриваемого момента времени до отказа невозстановливаемого электротехнического изделия или восстанавливаемого капитального ремонта оценивают по остаточному ресурсу изделия [2]. В действительности, зачастую, эти изделия могут быть использованы еще длительный период времени, так как нормальный режим работы ЭП позволяет обеспечивать их дальнейшую эксплуатацию в течение такого же периода времени, а иногда и больший.

На обмотку ЭП в режиме эксплуатации воздействуют различные процессы, к которым относятся электромагнитные (напряженность электромагнитного поля, уровень напряжения), термические (повышение температуры за счет изменения нагрузки), механические (влажность, давление). Все эти процессы в различной степени воздействуют на обмотку, при этом, согласно законам Монтзингера / Аррениуса, каждое повышение температуры на 8-10 °С вдвое сокращает срок службы изоляции [3-5]. Наличие инструмента, способного прогнозировать остаточный ресурс изоляции, может оказаться полезным для планирования работ по техническому обслуживанию и повышению производительности ЭП. Эти требования имеют решающее значение для ЭП, используемых в критически важных для безопасности применениях, таких как аэрокосмическая отрасль [6]. Важным отличием ЭП летательных аппаратов является их динамический режим работы, который зависит от условий эксплуатации борта. Летательный аппарат (ЛА) при разгоне, наборе высоты, в крейсерском режиме, снижении, посадке и при турбулентности требует различный тип нагрузки электрооборудования, и именно условия эксплуатации ЛА определяют режим работы ЭП. К примеру, в крейсерском режиме ЭП работает на холостом ходу, а в режиме турбулентности – при максимальной нагрузке.

В отечественной науке можно выделить ученых Ивановского государственного энергетического университета под руководством д.т.н., профессора Назарычева А.Н. [7-10]. Их исследовательская группа занимается построением моделей расчета эксплуатационной надежности и управления техническим состоянием электрооборудования. В частности, в [7] рассмотрены вопросы оценки ресурса электрооборудования. Представлена математическая модель и приведены результаты расчета расхода ресурса трансформаторов для различных условий эксплуатации. В [8] исследуются методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. В [9] и [10] разработаны методические основы определения предельных сроков эксплуатации и

очередности технического перевооружения объектов электроэнергетики и проанализированы методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. К сожалению, в работах ученых [7-10] исследуются лишь электротехнические изделия наземного применения, а тип их нагрузки носит статический характер, что не подходит к бортовым условиям.

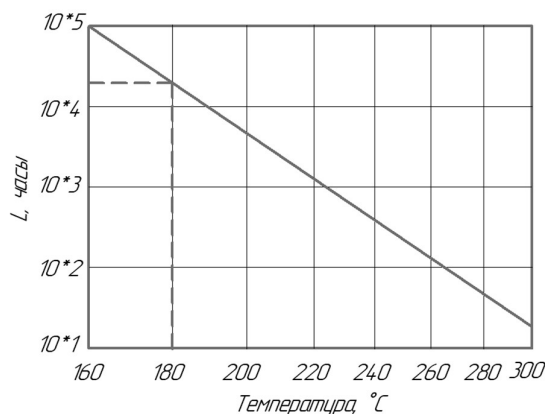
Среди зарубежных исследователей подобными исследованиями занимается исследовательская группа университета Ноттингема под руководством К.Герда [11-13]. В статье [11] экспериментально исследуется влияние кратковременной тепловой нагрузки на срок службы изоляции для электрических машин низкого напряжения со случайной намоткой. Анализ проводится на круглых эмалированных катушках с магнитной проволокой, которые выдерживаются при высоких тепловых циклах. Полученные результаты статистически обрабатываются с помощью двухпараметрического распределения Вейбулла. Согласно результатам постобработки и экспериментальных данных построена модель прогнозирования времени жизни. Эта модель используется для прогнозирования срока службы двигателя, встроенного в электромеханический привод для аэрокосмического применения. В работе [12] исследуется влияние частичных разрядов в изоляции на характеристики тягового двигателя. Представленное исследование объединяет модели конечных элементов и закон Пашена для воздуха при давлении на уровне моря. Разработанные модели изоляции экспериментально проверены с помощью измерений на изготовленных на заказ прототипах. В публикации [13] предлагается и описывается методика проектирования, ориентированная на надежность конструкции электрических машин низкого напряжения. Предварительно на образцах проводят испытания на термическое ускоренное старение изоляции обмотки. После оценки тенденции старения межвитковой изоляции определяется график тепловой выносливости при нескольких значениях перцентилей и разрабатываются модели срока службы как для режимов работы с постоянной, так и с переменной температурой. Наконец, эти модели используются для прогнозирования срока службы межвитковой изоляции двигателей, предназначенных для аэрокосмической и автомобильной промышленности.

Влияние температуры на срок службы изоляции электрических машин изучается с 1930-х годов, когда В.М. Монтзингер впервые представил «правило 10 градусов», согласно которому срок службы изоляции сокращается вдвое на каждые 10 °С приращения температуры [14]. Это эмпирическое правило было частично подтверждено в статье, опубликованной Дакином в 1947 г. [15]. В этой работе он демонстрирует, что физические изменения изоляционных материалов, подверженных термическому старению, являются результатом внутренних химических реакций, которые подчиняются закону Аррениуса. Согласно этому закону, срок службы  $L$  твердого изоляционного материала, в котором температура является преобладающим фактором напряжения, может быть определен как в

(1), где  $\theta$  - абсолютная температура, а  $A$  и  $B$  - две константы, которые зависят от материала.

$$L = A \cdot \exp(B/\theta). \quad (1)$$

Для данной изоляции путем экстраполяции срока службы  $L$  при трех или более температурах можно определить кривую Аррениуса (то есть зависимость срока службы изоляции от температуры). Последняя представляет собой прямую линию при отображении на полулогарифмическом графике, как можно увидеть на рис. 1, где показан пример кривой Аррениуса для изоляционного материала класса 180. Из рис. 1 можно получить ожидаемый срок службы изоляции при различных температурах [16].



**Рис. 1. Пример графика Аррениуса для изоляционного материала класса 180**

График Аррениуса строится на основании испытаний на ускоренное старение. Испытания заключаются в оценке срока службы материала для как минимум трех температур выше ожидаемого теплового класса. Для каждой из выбранных температур испытывается несколько образцов (обычно 5 или более), и регистрируется их время до отказа.

Для оценки разрушения образца необходимо выбрать критерий окончания срока службы. Затем можно определить диагностическое свойство (или маркер старения)  $r$ , присущее изоляционному материалу, которое должно меняться и следовать четкой тенденции по мере накопления теплового старения. Если образец выдерживают при стандартной температуре  $\theta_j$ , он выйдет из строя, когда  $r$  равно  $r_L$  (т.е. критерий окончания срока службы). Время, необходимое для того, чтобы  $r$  совпало с  $r_L$  (то есть время до отказа), соответствует  $L(\theta_j)$ , как графически показано на рис. 2. Следовательно, для термической аттестации обмотки ЭП необходимо подходящее диагностическое свойство  $r$  и конец срока службы. Критерий срока службы должен быть выбран до начала испытаний на ускоренное старение. Для ЭП с изоляцией типа I, рассчитанных на 300 В (или выше) среднеквадратическое значение и питаемых преобразователями ШИМ, критерием срока службы является начало частичного разряда. Свойство  $r$  в данном случае представляет собой начальное напряжение повторяющихся частичных

разрядов, которое постепенно уменьшается с тепловым старением, и когда оно в конечном итоге достигает предельного значения (т.е.  $p_L$ ), зависящее от характеристик ЭП (например, длины питающего кабеля и времени нарастания коммутационных устройств), образец выходит из строя.

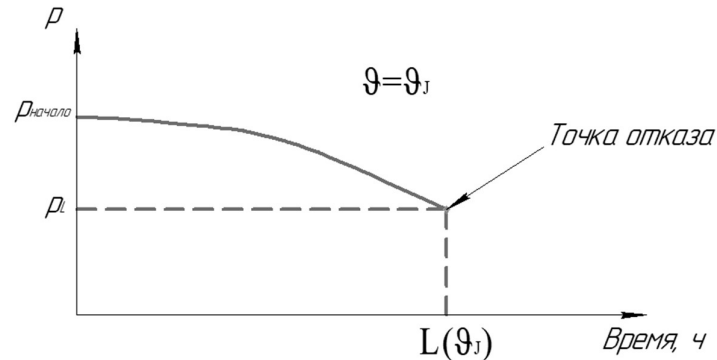


Рис. 2. Определение критерия окончания срока службы для общей изоляции.

Для ЭП с номинальным напряжением ниже 300 В среднеквадратичного значения необходимо учитывать другое диагностическое свойство, поскольку не ожидается, что эти ЭП в какой-либо момент времени будут иметь возникновение частичного разряда.

В этом случае наиболее распространенным маркером старения является электрическая прочность, подразумевая, что соответствующим критерием окончания срока службы является пробой диэлектрика. Это может быть обнаружено с помощью высокопроизводительного теста, а именно приложения напряжения, амплитуда которого выше, чем ожидаемая при нормальной работе.

Следовательно, термическая аттестация обмотки ЭП может быть достигнута с помощью следующей методики:

- 1) сначала необходимо определить три температуры выше (ожидаемого) класса изоляции;
- 2) для каждой из этих температур необходимо выдержать несколько образцов до обнаружения пробоя изоляции;
- 3) график Аррениуса определяется посредством регрессионного анализа (т.е. подбора кривой) медианы (или других процентилей) времени отказа. На этом этапе ясно, что, если выбранная температура значительно выше теплового класса, время до пробоя (т.е. время тестирования (старения)) будет относительно коротким. Тем не менее, для температур, близких к тепловому классу, время тестирования может быть очень долгим. Например, если принять материал по рис. 1, и выбрать температуру 200 °С, требуемое время старения составит  $\approx 5000$  часов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-38-70096.

Библиографический список

1. **Некрасов, А.И.** Оценка остаточного ресурса электрооборудования по физическим характеристикам / А.И. Некрасов, А.А. Некрасов, П.Н. Подобедов, И.М. Довлатов // Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование, 2018. – № 1
2. **ГОСТ 27.103-83** (СТ СЭВ 3943-82). Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 6с.
3. **Montsinger, V. M.** Loading transformers by temperature / V. M. Montsinger // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930. – vol. 49, no. 2, pp. 776-790.
4. **Dakin, T. W.** Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948. – vol. 67, no. 1, pp. 113-122.
5. **Montanari, G. C.** Aging phenomenology and modeling / G. C. Montanari, L. Simoni // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993. – vol. 28, no. 5, pp. 755-776.
6. **Giangrande, P.** Design and testing of PMSM for aerospace EMA application / P. Giangrande, V. Madonna, G. Sala, A. Kladas, C. Gerada, M. Galea // Presented at the 2018 annual conference of the IEEE industrial electronics society – IECON 2018, Washington DC, 2018.
7. **Назарычев, А.Н.** Математическая модель оценки расхода ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы / А.Н. Назарычев Д.А. Андреев, А.Ю. Блудов, А. Педро // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2007. – №2.
8. **Назарычев, А.Н.** Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования: монография / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев// Федер. Агентство по образованию, Иван. Гос. энергет. Ун-т В. И. Ленина, Петерб. Энергет. Ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов. – Науч. Изд. – Иваново: ИГЭУ, 2005. – 223 с.
9. **Назарычев, А.Н.** Методические основы оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев// Науч.-практ. изд. – Иваново : Иванов. гос. энергет. ун-т. - Иваново, 2005. – 166 с.
10. **Назарычев, А.Н.** Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А.Н. Назарычев; Под ред. Савельева В.А.; Иванов. Гос. Энергет. ун-т. – Иваново : [б.и.], 2002. – 167 с.
11. **Vincenzo Madonna.** Thermal overload and insulation aging of short duty cycle, aerospace motors / Madonna Vincenzo, Paolo Giangrande, Luca Lusuardi, Andrea Cavallini, Chris Gerada, Michael Galea // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 4, 2020
12. **Vincenzo Madonna.** Reliability vs. Performances of Electrical Machines: Partial Discharges Issue / Madonna Vincenzo, Paolo Giangrande, Weiduo Zhao, Giampaolo Buticchi, He Zhang, Chris Gerada, Michael Galea // 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2019.
13. **Giangrande Paolo.** Moving Towards a Reliability-Oriented Design Approach of Low-Voltage Electrical Machines by Including Insulation Thermal Aging Considerations / Paolo Giangrande, Vincenzo Madonna, Stefano Nuzzo, Michael Galea // IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020. – vol. 6, no. 1.
14. **Монтзингер, В. М.** Нагрузка трансформаторов по температуре / В. М. Монтзингер // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930. – вып. 49, с. 776-790.
15. **Дакин, Т. В.** Ухудшение состояния электрической изоляции, рассматриваемое как химическое явление / Т. В. Дакин // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, вып. 67, с. 113-122.
16. **Vincenzo Madonna.** On the Thermal Insulation Qualification of Low Voltage Electrical Machines / Vincenzo Madonna, Paolo Giangrande, Giovanni Migliazza, Giampaolo Buticchi, Michael Galea // IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019.

D.V. Gusakov

## FORECASTING THE TECHNICAL STATE OF AIRCRAFT POWER CONVERTERS

Ufa State Aviation Technical University

**Abstract:** The article discusses and analyzes the aging processes of the insulation of the conductive parts of the energy converter. An overview of the existing methods for assessing the aging of insulation is given. The main dependencies are presented, with the help of which it is possible to determine the service life of energy converters and the criterion of the end of service life for general insulation is described.

**Key words:** forecasting, energy converters, aging of insulation, accelerated testing.

### References

- [1] A.I. Nekrasov, “Otsenka ostatochnogo resursa elektrooborudovaniya po fizicheskim kharakteristikam [Assessment of the residual resource of electrical equipment by physical characteristics]”, *Tekhnolo-gii, sredstva mekhanizatsii i energeticheskoye oborudovaniye [Technologies, means of mechanization and power equipment]*, no. 1, 2018 (in Russian)
- [2] Montsinger, V. M. Loading transformers by temperature / V. M. Montsinger // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930. – vol. 49, no. 2, pp. 776-790.
- [3] Dakin, T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948. – vol. 67, no. 1, pp. 113-122.
- [4] Montanari, G. C. Aging phenomenology and modeling / G. C. Montanari, L. Simoni // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993. – vol. 28, no. 5, pp. 755-776.
- [5] Giangrande, P. Design and testing of PMSM for aerospace EMA application / P. Giangrande, V. Madonna, G. Sala, A. Kladas, C. Gerada, M. Galea // Presented at the 2018 annual conference of the IEEE industrial electronics society – IECON 2018, Washington DC, 2018.
- [6] A.N. Nazarychev, “Matematicheskaya model' otsenki raskhoda resursa elektrooborudovaniya s uchetom rezhimov yego raboty [Mathematical model for assessing the resource consumption of electrical equipment taking into account the modes of its operation]”, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University]*, no 2, 2007 (in Russian)
- [7] A.N. Nazarychev, D.A. Andreev, “Metody i matematicheskiye modeli kompleksnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya: monografiya [Methods and mathematical models for a comprehensive assessment of the technical condition of electrical equipment: monograph]”, *Feder. Agenstvo po obrazovaniyu, Ivan. Gos. energet. Un-t V. I. Lenina, Peterb. Energet. In-t povysheniya kvalifikatsii rukovodyashchikh rabotnikov i spetsialistov. – Nauch. Izd. – Ivanovo: IGEU [Feder. Education agency, Ivan. State energetic. University of V.I. Lenin, St. Petersburg. Energy. Institute of advanced training of executives and specialists. - Sci. Ed. - Ivanovo: ISEU]*, pp. 223, 2005 (in Russian)
- [8] A.N. Nazarychev, D.A. Andreev, “Metodicheskiye osnovy optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob"yektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya [Methodical bases of optimization of repair of electrical equipment of power facilities taking into account the technical condition]”, *Nauch.-prakt. izd. – Ivanovo : Ivanov. gos. energet. un-t. – Ivanovo [Scientific-practical. ed. - Ivanovo: Ivanov. state energetic. un-t. - Ivanovo]*, pp. 166, 2005 (in Russian)



- [9] A.N. Nazarychev, “Metody i modeli optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob"yektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya [Methods and models for optimization of repair of electrical equipment of energy facilities taking into account the technical condition]”, *Ivanov. Gos. Energet. un-t. – Ivanovo [b.i.] [Ivanov. State Energy. un-t. - Ivanovo: [b.i.]], pp. 167, 2002 (in Russian)*
- [10] Vincenzo Madonna. Thermal overload and insulation aging of short duty cycle, aerospace motors / Madonna Vincenzo, Paolo Giangrande, Luca Lusuardi, Andrea Cavallini, Chris Gerada, Michael Galea // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, 2020
- [11] Vincenzo Madonna. Reliability vs. Performances of Electrical Machines: Partial Discharges Issue / Madonna Vincenzo, Paolo Giangrande, Weiduo Zhao, Giampaolo Buticchi, He Zhang, Chris Gerada, Michael Galea // *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2019.
- [13. Giangrande Paolo. Moving Towards a Reliability-Oriented Design Approach of Low-Voltage Electrical Machines by Including Insulation Thermal Aging Considerations / Paolo Giangrande, Vincenzo Madonna, Stefano Nuzzo, Michael Galea // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020. – vol. 6, no. 1.
- [14] V. M. Montzinger, “Nagruzka transformatorov po temperature [Load of transformers by temperature]” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, pp. 776-790, 1930(in Russian)
- [15] T.V. Dakin, “Ukhudsheniye sostoyaniya elektricheskoy izolyatsii, rassmatrivayemoye kak khimicheskoye yavleniye [Deterioration of the state of electrical insulation, considered as a chemical phenomenon]” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, pp. 113-122, 1948 (in Russian)
- [16] Vincenzo Madonna. On the Thermal Insulation Qualification of Low Voltage Electrical Machines / Vincenzo Madonna, Paolo Giangrande, Giovanni Migliazza, Giampaolo Buticchi, Michael Galea // *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019.

УДК 621.3

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_14

А.О. Кечкин <sup>1</sup>, А.С. Плехов <sup>2</sup>

## УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

ООО «Компания «ВИД»<sup>1</sup>,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>2</sup>

**Аннотация:** Эффективность работы силовых преобразователей электроэнергии зависит не только от способов управления, но и от качества измерительной аппаратуры. Данное устройство ориентировано на использование в составе преобразователей частоты, выпрямителях, DC/DC конверторах малой и средней мощности. Широкий спектр алгоритмов обработки измеряемых величин для данного устройства позволяет уменьшить нагрузку на узлы управления, а наличие распространённых промышленных интерфейсов связи обеспечивает совместимость со многими контроллерами. Для группы измерительных устройств предусмотрена возможность организации единой сети с кольцевой топологией. Дублирование интерфейсов связи повышает отказоустойчивость системы в целом. Предусмотрены алгоритмы для анализа аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** преобразователь параметров электроэнергии, датчик напряжения, датчик тока, измерительное устройство.

### Введение

В настоящее время вместо тиристорных преобразователей средней мощности в промышленности активно используются транзисторные преобразователи. Системы автоматического управления таких преобразователей требуют наличия датчиков электрических параметров и каналов передачи сигналов для построения обратных связей высокого качества [1]. В условиях работы с импульсными устройствами [2], являющимися источниками электромагнитных помех, необходимо размещать датчики на некотором удалении от возможных излучателей и передавать информацию по скоростному, помехозащищенному каналу связи.

### Структура устройства

Предлагаемое измерительное устройство построено с применением датчиков на основе элементов Холла [3] с токовым уравниванием магнитного потока в магнитопроводе датчика. Измеренные электрические параметры в виде токовых сигналов поступают на входы блоков преобразования, выполненных на базе операционных усилителей. Данные блоки преобразуют токовые сигналы в сигналы напряжения, стандартные для АЦП микроконтроллера. Микроконтроллер производит обработку оцифрованных величин и отправляет информацию по нескольким каналам связи. Для передачи информации были выбраны

востребованные промышленные интерфейсы [4] CAN, RS485, RS422. Функциональная схема устройства представлена на рис.1.

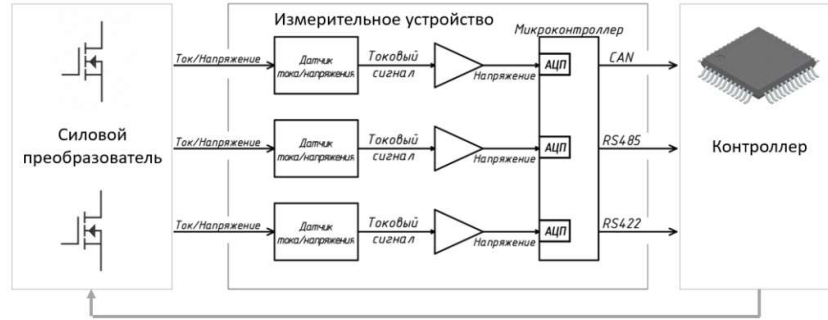


Рис. 1. Функциональная схема измерительного устройства

Принципиальная схема одного канала блока преобразования представлена на рис. 2.

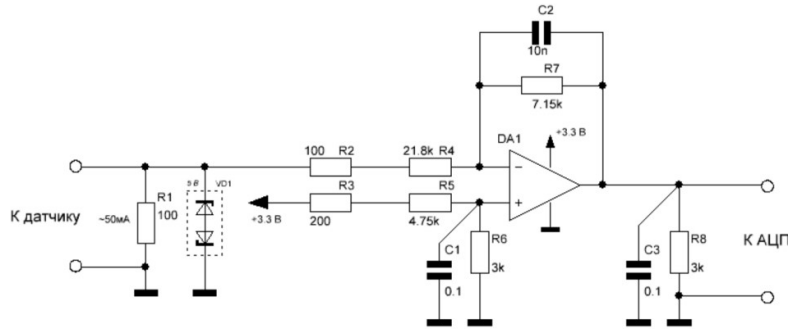


Рис. 2. Принципиальная схема канала блока преобразования

Токовый сигнал с датчика поступает на нагрузочный резистор R1, создавая напряжение амплитудой до 5 В, для ограничения напряжения установлен двунаправленный защитный диод VD1. Напряжение с нагрузочного резистора поступает на схему с дифференциальным включением операционного усилителя DA1. Резисторы R2 и R3 необходимы для точной подстройки коэффициента передачи схемы. В общем случае связь между входным и выходным напряжением можно описать следующим уравнением [5]:

$$U_{out} = \frac{(R2 + R4 + R7) \cdot R6}{(R3 + R5 + R6) \cdot (R2 + R4)} \cdot U_{ref} - \frac{R7}{R2 + R4} \cdot U_{in}, \quad (1)$$

где  $U_{out}$  – напряжение на резисторе R8;  $U_{ref}$  – опорное напряжение 3.3 В;  $U_{in}$  – напряжение на нагрузочном резисторе R1.

Для снижения влияния помех на высоких частотах установлены конденсаторы C1–C3.

В зависимости от установленного датчика, данное устройство позволяет производить измерения токов (датчик LA100-P) или напряжений (датчик LV25-P.SP5). Для установки датчиков конструкцией устройства предусмотрено

универсальное посадочное место, однако из-за разного выходного тока датчиков необходимо корректировать номиналы сопротивлений блока преобразования.

### Характеристики устройства

Измерительное устройство выполнено на базе микроконтроллера STM32F103. Вычислительная мощность микроконтроллера позволяет реализовать цифровые фильтры, получать среднее, действующее, мгновенное значение измеряемых величин [6]. Имеется возможность рассчитывать спектр и производить гармонический анализ сигналов. Использование микроконтроллера для промежуточной обработки измеряемых величин позволяет снизить нагрузку на центральное устройство управления преобразователем, передача данных по скоростным помехозащищенным каналам связи минимизирует задержки в контурах регулирования САУ [7]. Каждый интерфейс связи гальванически развязан и дублирован для обеспечения резервирования.

Основные параметры устройства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры устройства

Параметр	Значение	Ед. измерения
Диапазон входных напряжений	-600..+600	В
Диапазон входных токов	-100..+100	А
Количество каналов измерения	3	
Напряжение питания	18–36	В
Потребляемый ток	200	мА
Скорость передачи данных RS422	до 10	Мбит
Скорость передачи данных CAN	до 1	Мбит

Устройство специфицировано для работы с трехфазными преобразователями. Предусмотрена возможность комбинирования датчиков тока и напряжения, что позволяет производить измерение токов, напряжений и мощности в звене постоянного тока. Внешний вид устройства измерения представлен на рис. 3.

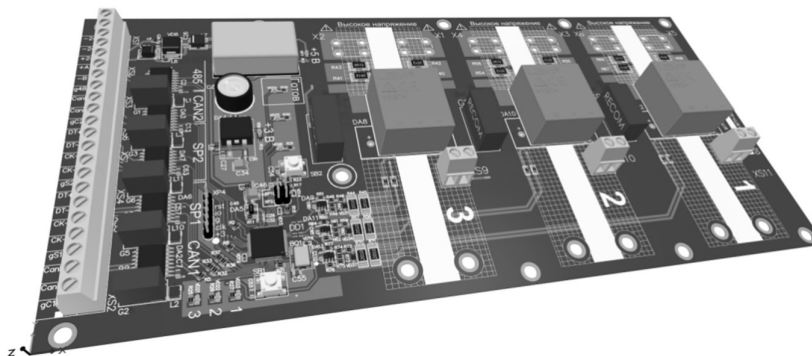


Рис. 3. Внешний вид измерительного устройства

## Особенности устройства

В процессе эксплуатации силовых преобразователей возможны различные аварийные ситуации [8], которые влекут за собой отключение питания всех узлов. После аварийного сброса питания измерительное устройство продолжает работать некоторое время, необходимое для сохранения последних значений электрических параметров в энергонезависимую память. Данное решение позволяет реализовать защиту при последующем запуске системы, если причина аварии не будет ликвидирована, также появляется возможность оценить величину сигнала на аварийном канале.

По результатам испытаний в составе преобразователя частоты ПЧ-100-400 (производство ООО «Компания «ВИД») устройство показало следующие характеристики.

Таблица 2

Результаты испытаний устройства

Измеряемый параметр	Номинальное значение	Отклонение
Действующее значение напряжения	127 В	$\pm 0,1В$
Действующее значение тока	100 А	$\pm 0,016А$
Выходная частота	400 Гц	$\pm 0,01 Гц$

Расчетная погрешность измерения аналоговых сигналов складывается из погрешности датчиков, погрешности схемы преобразования токового сигнала в сигнал напряжения и погрешности АЦП микроконтроллера.

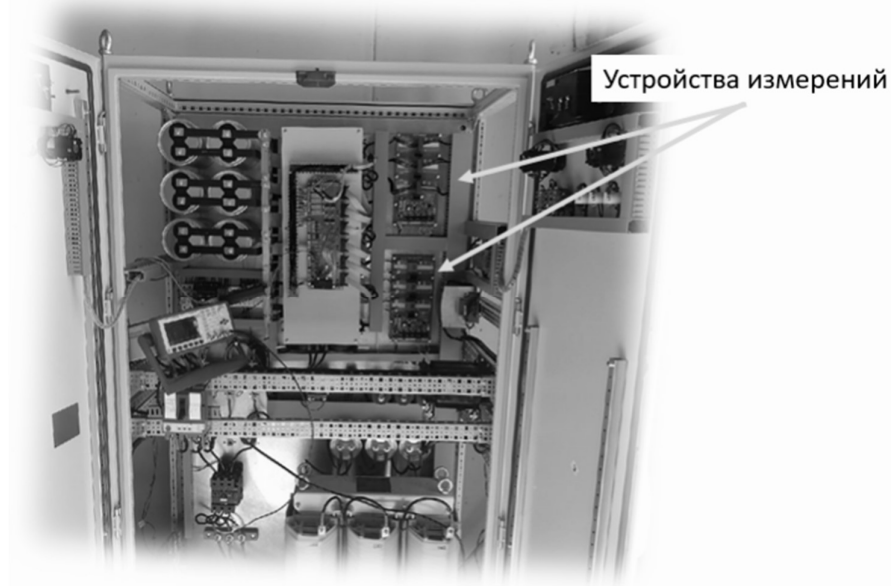


Рис. 4. Измерительные устройства в составе преобразователя частоты

Устройство выполнено на импортной компонентной базе, но ориентировано на использование отечественных комплектующих. Микроконтроллер STM32F103 может быть заменен аналогом K1986VE92Q1 фирмы «Миландр» [9]. Также фирма «Миландр» предоставляет выбор микросхем интерфейсов связи. Источники питания для датчиков тока и напряжения могут быть заменены аналогами от фирмы «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК».

### Выводы

Данное устройство упрощает и унифицирует концепцию построения преобразователей малой и средней мощности.

Наличие распространённых скоростных интерфейсов связи уменьшает количество проводов, увеличивает помехозащищённость и позволяет сформировать единую сеть измерительных устройств.

Использование данного устройства снижает нагрузку на центральное устройство управления, так как самостоятельно производит необходимую обработку сигналов по месту.

Дублированные интерфейсы связи позволяют реализовать сеть устройств различной топологии. Возможность реализации кольцевой топологии устройств измерения увеличивает отказоустойчивость системы в целом.

### Библиографический список

1. **Кориков, А.М.** Основы теории управления: учеб. пособие, 2-е изд. / А.М. Кориков. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 392 с.
2. **Бесекерский, В.А.,** Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский. – М.: Наука, 1975. – 27 с.
3. **Белов, М.П.** Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие / М.П. Белов. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 81 с.
4. Промышленные сети и интерфейсы. Модель OSI [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.energyed.ru/Auto/PlcCh02> (дата обращения 1.05.2021).
5. Дифференциальное включение [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/op\\_3.htm](http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/op_3.htm) (дата обращения 1.05.2021).
6. Application note. STM32Cube firmware examples for STM32F1 Series. STMicroelectronics. 2010. – 6 с.
7. **Abdulrahman, A.O.** Saman M. Omer, Zrar K. Abdul Microcontroller based smart house / A.O. Abdulrahman // Journal Of Raparin University - Vol.3, No.8, October 2016
8. **Белов, М.П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, А.Д. Новиков. – 3-е изд. – М.: Академия, 2007. – 456 с.
9. **Алалуев, Р. В.** Основы программирования 32-разрядных микроконтроллеров 1986VE91T компании «Миландр»: руководство к выполнению лабораторных работ / Р. В. Алалуев – г. Тула, 2017. – 16 с.

A.O. Kechkin <sup>1</sup>, A.S. Plekhov <sup>2</sup>

**DEVICE FOR MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS FOR  
SMALL AND MEDIUM POWER CONVERTERS**

LLC «Company “VID”»<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia<sup>2</sup>

**Abstract:** The efficiency of electric power converters depends not only on the control methods, but also on the quality of the measuring equipment. This device is designed for use as part of frequency converters, rectifiers, DC/DC converters of low and medium power. A wide range of algorithms for processing measured values for this device allows you to reduce the load on control nodes, and the presence of common industrial communication interfaces ensures compatibility with many controllers.

**Key words:** power parameter converter, voltage sensor, current sensor, measuring device.

**References**

- [1] Korikov A.M. “Osnovy teorii upravleniia: Uchebnoe posobie. 2-e izd [Fundamentals of management theory: A textbook. 2nd ed.]”. – Tomsk: Izd-vo NTL, 2002. – 392 pp. (in Russian)
- [2] Besekerskii V.A., Popov E.P. “Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Theory of automatic control systems]”. – Moscow.: Nauka, 1975. – 27 pp. (in Russian)
- [3] Belov M.P. “Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii i upravleniia: ucheb. Posobie [Technical means of automation and control: a textbook]”. – St. Petersburg.: SZTU, 2006. – 81 pp. (in Russian)
- [4] “Promyshlennye seti i interfeisy. Model' OSI [Industrial networks and interfaces. The OSI model]” [Online]. Available at: <http://www.energyed.ru/Auto/PlcCh02> (Accessed: May. 1, 2021).
- [5] “Differentsial'noe vkluchenie [Differential inclusion]” [Online]. – URL: [http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/doc/op/op\\_3.htm](http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/doc/op/op_3.htm) (Accessed: May. 1, 2021).
- [6] Application note. STM32Cube firmware examples for STM32F1 Series. STMicroelectronics. 2010. – 6 pp.
- [7] Abdulrahman A.O., Saman M. Omer, Zrar K. Abdul Microcontroller based smart house // Journal Of Raparin University - Vol.3, No.8, October 2016

УДК 681.518.5+621.311.6

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_20

**Р.Ю. Кузьменко, И.И. Таболин****АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ  
СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕМЕТРИИ  
ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ**

Воронежский государственный технический университет

**Аннотация:** В статье рассматривается аппаратно-программный модуль имитации параметров аккумуляторной батареи, входящий в состав автоматизированной системы управления и диагностики, выполняющей функции наземной отработки технических узлов, входящих в систему энергообеспечения космических аппаратов. Показаны основные имитируемые параметры и команды модуля, синтезирована функциональная схема блоков имитации телеметрии и подачи команд. Рассмотрены основные алгоритмы управления имитацией параметров для никель-водородной аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** система энергоснабжения, аккумуляторная батарея, имитационное моделирование, автоматизированная система управления и диагностики, аппаратно-программный модуль.

**Введение**

Создание высокоэффективной и надёжной системы энергоснабжения космического аппарата (СЭС КА) невозможно без использования специальных автоматизированных систем управления и диагностики (АСУД), позволяющих контролировать узлы и модули СЭС как в процессе производства, так и при предстартовых наземных испытаниях. Применение имитационного моделирования позволяет повысить эффективность испытаний, особенно в части экономии электроэнергии и сокращении времени проверок при отработке различных алгоритмов диагностики узлов СЭС КА [1].

Особенно ярко это проявляется при использовании реальных аккумуляторных батарей (АБ) в автоматизированной системе диагностики в процессе проведения испытаний технических средств, входящих в систему энергообеспечения космического аппарата. В связи с особенностями протекающих химических процессов и ограниченными пределами эксплуатационных характеристик АБ (по максимальному току заряда и разряда, температуре, давлению и т.п.) не представляется возможным их участие при отработке различных ускоренных алгоритмов проверок СЭС и имитации пиковых нагрузок. Это приводит к сокращению срока эксплуатации и, как следствие, невозможности дальнейшего использования АБ в СЭС КА.



## Постановка задачи исследования

Применение аккумуляторных батарей на основе лития (литий-ионные, литий-полимерные и т.п.) находят всё более массовое применение в космической отрасли. Но на современном этапе при условиях длительной эксплуатации КА на околоземной орбите (10 и более лет) и повышенных требованиях к надёжности, часто продолжают использовать никель-водородные аккумуляторные батареи (НВАБ) [2].

Целью данного исследования является замена реальной НВАБ в АСУД на его имитационный аналог – аппаратно-программный модуль имитатора аккумуляторной батареи (АПМ ИАБ). Данный модуль позволит формировать заданный информационный массив параметров НВАБ и передавать его по цифровому интерфейсу в зарядно-разрядное устройство (ЗРУ) СЭС КА, а также вырабатывать сигналы управления запрета заряда и разряда в случае возникновения не штатных ситуаций при испытаниях в составе АСУД.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать характеристики и параметры разрабатываемого ИАБ;
- синтезировать функциональную схему модуля;
- показать возможные алгоритмы работы ИАБ в АСУД.

## Характеристики аппаратно-программного модуля имитатора АБ

Главной задачей при проектировании ИАБ является получение возможности имитации многоальтернативных режимов работы НВАБ в СЭС [3], максимально приближенных к реальным, которые могут возникнуть на орбите при эксплуатации энергосистемы КА [4].

Для этого модуль должен выполнять следующие основные функции:

- формировать массив напряжений каждого аккумуляторного элемента, входящего в НВАБ, а также общего напряжения на батарее;
- формировать массив напряжений каждого датчика давления (ДД), установленных внутри нескольких аккумуляторов НВАБ, а также среднего значения давления и преобразовывать его в кгс/см<sup>2</sup>;
- формировать массив напряжений каждого датчика температуры (ДТ), установленного на корпусах нескольких аккумуляторов НВАБ, а также среднего значения температуры и преобразовывать его в °С;
- сформированный массив всей телеметрии по цифровому интерфейсу (применяются в основном CAN, RS-485 и т. п) должен передаваться в ЗРУ СЭС с помощью специального протокола обмена информацией;
- автоматически перестраивать имитируемые параметры НВАБ по заданной программе испытаний (напряжения ДД, ДТ, напряжения на каждом элементе и общее напряжение АБ). При этом должен быть предусмотрен режим

ручного ввода параметров (статический режим), который обычно применяется на начальных стадиях испытаний ЗРУ СЭС;

– имитировать случай выхода из строя интерфейса связи с ЗРУ, при этом АПМ ИАБ должен обеспечить прохождение проводных команд управления (запрет заряда при превышении заданного порога давления и температуры или запрет разряда при уменьшении заданного уровня общего напряжения на НВАБ);

– осуществлять постоянную запись всей телеметрической информации в специальную базу данных с момента начала проведения испытаний до их завершения или полного отключения АСУД. Это позволит в случае возникновения незапланированной аварийной ситуаций как в ЗРУ СЭС КА, так и в АСУД провести разработчикам детальный анализ аварии и принять решение для дальнейших действий (продолжить диагностику, перезапустить программу испытаний после замены неисправного узла и т.п.);

– для имитации силовых цепей ИАБ применять источники с рекуперацией энергии (в режиме имитации заряда АБ мощность заряда должна выделяться не в тепло, а поступать обратно в промышленную сеть).

### **Функциональная схема аппаратно-программного модуля**

Структуру АПМ ИАБ можно разделить на три основных функциональных части (рис. 1);

1. программный модуль имитатора (ПМИ);
2. программный имитатор управления силовыми источниками питания (ИАБ) и, собственно, сами источники питания (силовая стойка 1 ИАБ);
3. набор шин интерфейсов связи ПМИ и ИАБ с ЗРУ и АСУД.

На рисунке далее изображена функциональная схема АПИ ИАБ в составе АСУД в сокращённом виде (показаны интерфейсы управления и обмена информацией без силовых шин ИАБ, имитатора солнечных батарей (ИСБ) и имитатора бортовой нагрузки (ИБН)).

### **Основные алгоритмы работы имитатора АБ**

Программный модуль имитатора, как и модуль управления источниками питания (ИАБ), входит в состав программного обеспечения (ПО) ЭВМ 1. При этом центральная ЭВМ (ЦЭВМ), входящая в состав АСУД (рис. 1), через интерфейс Ethernet и коммутатор задаёт необходимый режим работы ИАБ (ручной или автоматический).

При ручном режиме ИАБ управляется с помощью ПМИ ЭВМ1. В данном режиме испытатель (оператор) может вносить любые изменения в передаваемый массив параметров для ЗРУ (информация поступает по интерфейсу CAN).

В автоматическом режиме ИАБ также управляется с помощью ПМИ ЭВМ1, но при этом выбор алгоритма проверки (номер или название выбираемой программы) осуществляется ЦЭВМ АСУД. После инициализации начала испытаний оператор повлиять на ход проверки уже не может (кроме подачи команды принудительной остановки испытаний).

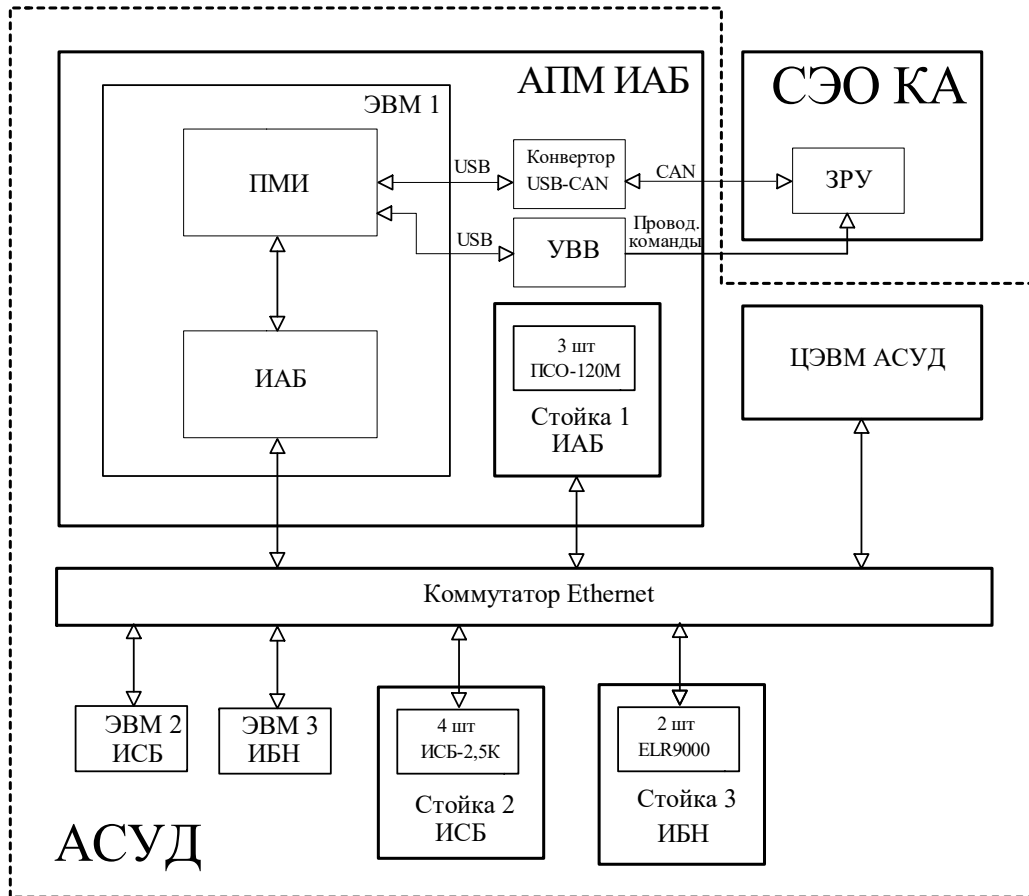


Рис. 1. Функциональная схема АПМ ИАБ в составе АСУД

Программные модули ПМИ и ИАБ, входящие в ЭВМ1, работают синхронно по времени и изменяемым параметрам имитации напряжения на каждом аккумуляторном элементе (АЭ). То есть при изменении напряжения на любом АЭ суммарное напряжение на ИАБ также корректируется.

Разработанный АПМ позволяет с помощью дополнительного устройства ввода-вывода (УВВ, рис. 1) проверять выполнение проводных команд запрета заряда и разряда в случае имитации аварии по цепям интерфейса CAN (например, обрыв цепей). Управление силовыми стойками ИСБ и ИБН (стойки 2 и 3) осуществляется с помощью ЭВМ 2 и ЭВМ 3, которые в свою очередь получают команды через информационную шину Ethernet от ЦЭВМ АСУД.

## Заключение

Разработанный автоматизированный программный модуль имитатора параметров АБ имеет следующие преимущества (в сравнении с использованием реальной НВАБ);

- ИАБ позволит более детально отработать возможные штатные и аварийные режимы работы блока ЗРУ в СЭС КА;
- испытатель имеет возможность исследовать любой режим ЗРУ или любого другого узла СЭС при проверке всей системы энергообеспечения без ограничения времени испытания [5];
- при включенном автоматическом режиме испытаний исключается возникновение критической ошибки оператора при проведении проверок.

Дальнейшее развитие АПМ ИАБ подразумевает увеличение его универсальности, то есть получение возможности имитации параметров не только НВАБ, но и, например, литий-ионных аккумуляторных батарей.

## Библиографический список

1. **Шурыгин, Ю.А.** Аппаратно-программный комплекс автоматизации процессов предстартовых испытаний систем энергообеспечения космических аппаратов / Ю.А. Шурыгин, В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 305–309.
2. Никель-водородные аккумуляторные батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://saturn-kuban.ru/>, свободный – (01.03.2021).
3. **Данилов, А. Д.** Автоматизированная система диагностики и контроля для наземной отработки энергоузлов МКС / А. Д. Данилов, Р. Ю. Кузьменко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. – 2019. – С.147-150.
4. **Данилов, А. Д.** Алгоритмы управления специализированными исполнительными устройствами систем электрообеспечения МКС / А. Д. Данилов, А.О. Тищенко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. – 2017. – С.126-128.
5. **Данилов, А.Д.** Исследование энергосберегающих систем электроснабжения космических аппаратов / А. Д. Данилов, А.О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5-1. С. 82-84.

**R. Y. Kuzmenko, I. I. Tabolin**

**HARDWARE AND SOFTWARE MODULE FOR GENERATING CONTROL SIGNALS AND TELEMETRY FOR SIMULATING BATTERY PARAMETERS**

Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russia

**Abstract:** The article considers a software and hardware module for modeling the parameters of a battery, which is part of an automated control and diagnostic system that performs the functions of ground testing of technical components that are part of the spacecraft power supply system. The main modeled parameters and commands of the module are shown, the functional scheme of the blocks for modeling telemetry and sending commands is synthesized. The basic control algorithms for modeling the parameters of a nickel-hydrogen battery are considered.

**Key words:** power supply system, battery, simulation, automated control and diagnostic system, hardware and software module.

**References**

- [1] Y. A. Shurygin and V. N. Mishin, “Software and hardware complex for automation of pre-launch tests of spacecraft power supply systems”, TUSUR reports, vol 1, no. 2(24), pp. 305-309, 2011.
- [2] Nickel-hydrogen rechargeable batteries [Electronic resource]. Available at: <http://saturn-kuban.ru/>, free – (01.03.2021).
- [3] D Danilov and R.Y. Kuzmenko, “Automated diagnostic and control system for ground-based testing of ISS power nodes”, New technologies in research, design, management, and production, pp. 147-150, 2019.
- [4] A.D. Danilov and A.O. Tichenko, “Algorithms for controlling specialized Executive devices of ISS electrical supply systems”, New technologies in research, design, management, and production, pp. 126-128, 2017.
- [5] D. Danilov and A.O. Tichenko, “Research of energy saving power supply systems for spacecraft”, Bulletin of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia., 2014. vol 10, no. 5-1, pp. 82-84, 2014.

УДК 621.314.228

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_26

**Л.Э. Рогинская, З.И. Ялалова, Ю.В. Рахманова, А.С. Горбунов****ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ФИЛЬТРОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА**

Уфимский государственный авиационный технический университет

**Аннотация.** В статье рассмотрен принцип действия высоковольтного трансформатора для агрегата питания фильтров очистки воздуха. Приведены конструктивные особенности трансформатора. Рассмотрен принцип действия и приведен анализ процесса работы агрегата питания на базе высоковольтного трансформатора.

**Ключевые слова:** трансформатор, выпрямитель, источники питания, агрегат питания, электрофильтры

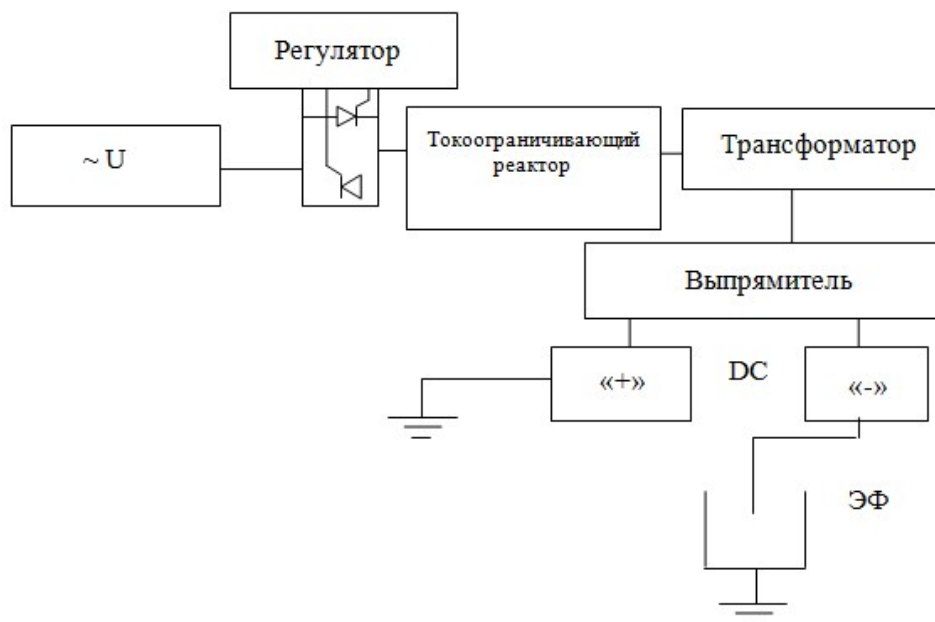
Во многих видах производственной деятельности, в том числе в промышленности, происходит выделение в атмосферу различных частиц, таких как пыль, туман, пары и радиоактивные вещества, что влечет за собой недопустимые последствия для экологии. Одним из наиболее современных способов очистки газов и улавливания частиц в воздухе является применение электрофильтров [1].

Принцип действия электрофильтров основан на ионизации частиц пыли, в основном отрицательной полярности, в газе с помощью коронного разряда, возникающего при применении электрического напряжения большой величины от источника постоянного тока. Электроны, образовавшиеся у коронирующего электрода, перемещаются под действием силовых линий электрического поля к положительно заряженному электроду, встречая на своем пути частицы пыли, заряжая их, осаждаются на поверхности положительного электрода. Такой процесс носит название «процесс осаждения», а положительный электрод в некоторых источниках литературы, носит название «осадительный». В результате процесса, газы, пройдя электрическое поле электрофильтра, очищаются от пыли, которая осаждается на этих электродах и удаляется с их поверхности.

Источником питания таких электрофильтров является агрегат питания, состоящий из высоковольтного трансформатора, выпрямителя и системы автоматического регулирования. Принцип действия агрегата заключается в следующем: трансформатор питает электрофильтр через выпрямитель, отрицательный полюс выпрямителя соединен с коронирующим электродом электрофильтра, а положительный полюс и «осадительный» электрод заземлены.

Степень очистки газов в электрофильтре зависит от приложенного напряжения, определяющего напряженность электрического поля: чем выше напряженность, тем выше степень очистки газов. Однако при определенном значении напряженности электрического поля прочность газового промежутка нарушается, происходит искровой и дуговой разряд, и наступает пробой межэлектродного промежутка. Для поддержания на электродах электрофильтра напряжения

на достаточно высоком уровне вблизи пробоя агрегаты питания снабжаются системой автоматического регулирования, которая отслеживает изменяющуюся границу пробоя.



**Рис.1. Упрощенная диаграмма функционирования источника питания для электрофильтров**

Подобные агрегаты питания для электрофильтров изготавливаются на производственных площадках АО «ЭЛЕКТРОЗАВОД».

Рассмотрим принцип работы устройства АПТД-1000-80/110, «агрегат преобразовательный трансформаторный диодный» с номинальным напряжением сети 380 В частоты 50 Гц, обеспечивающем питание электрофильтра с номинальным выпрямленным током 1000 мА при напряжении 80 кВ (I режим)/110кВ (II режим). Агрегаты могут работать в двух режимах: режим максимальной мощности (максимальный коэффициент трансформации) и режим минимальной мощности (минимальный коэффициент трансформации). Конструкция агрегата питания типа АПТД-1000/80/110 представлена на рис.2.

Агрегаты предназначены для питания постоянным током высокого напряжения и автоматического регулирования режимов работы электрофильтров промышленной очистки газов.

Конструктивно агрегат состоит из следующих составных частей:

- выпрямительного устройства;
- высоковольтного соединителя;
- устройства автоматического регулирования полей электрофильтра.



**Рис.2. Агрегат питания АПТД-1000-80/110**

Основными элементами выпрямительного устройства являются высоковольтный однофазный повышающий трансформатор, высоковольтный выпрямительного мост с системой симметрирующего экранирования, токоограничивающий реактор, защитный реактор.

Главной особенностью и одним из важнейших элементов агрегата является высоковольтный трансформатор.

Высоковольтные трансформаторы отличаются от обычных силовых трансформаторов меньшим запасом электрической прочности, поэтому масса-габаритные показатели таких трансформаторов намного ниже [2].

Высоковольтный трансформатор агрегата состоит из шихтованного П-образного магнитопровода, на каждом стержне которого расположены обмотки. Первичная обмотка трансформатора позволяет осуществлять переключение агрегата на два положения. Обмотка низкого напряжения двухслойная, выполняется из медного прямоугольного провода с бумажной изоляцией [4].

В низковольтной цепи агрегата включены два тиристора по встречно-параллельной схеме; которые служат для регулирования выходного напряжения. Управление тиристорами осуществляется от регулятора, служащего для ограничения тока короткого замыкания.

Последовательно с силовым трансформатором в низковольтной цепи включен линейный токоограничивающий реактор, необходимым для ограничения тока при пробоях в электрофильтре и улучшения формы тока агрегата.

Обмотка высокого напряжения (многослойная) выполняется из круглого медного провода с эмалевой изоляцией.

Отводы обмотки высшего напряжения подключены к высоковольтному выпрямительному мосту, собранному по однофазной мостовой схеме. Положительный полюс выпрямительного моста выведен на крышку бака и заземлен.



Отрицательный полюс подключен к высоковольтному защитному реактору, и выведен на крышку бака и через кабельный ввод соединяется с электрофильтром. В качестве выпрямителей в схеме используют кремниевые диоды, обладающих рядом положительных характеристик, однако их применение требует специальных мер для создания равномерного распределения напряжения по элементам выпрямителя. Ввиду того, что кремниевые диоды имеют очень высокое обратное сопротивление, они обладают малой проводимостью, вследствие которой становится заметной емкостная проводимость на землю. При учете емкости на землю через сопротивления диодов протекают различные токи, поэтому напряжения на диодах разные. Через сопротивление ближайшего к высоковольтному выводу диода протекает наибольший ток, поэтому падение напряжения на этом диоде будет наибольшее, а напряжение на диоде, ближайшем к «земле», будет наименьшим. Для выравнивания распределения напряжения вдоль цепочки диодов плечи однофазного двухполупериодного моста охватываются симметрирующими экранами.

Все перечисленные составные элементы агрегата размещены в баке, заполненном минеральным трансформаторным маслом.

Регулятор напряжения включается на первичной стороне и устанавливается на баке агрегата.

Анализ процесса работы агрегата питания с тиристорным регулятором приведен на рис. 3. Основные допущения, принятые при аналитическом рассмотрении процессов, приведены в [3].

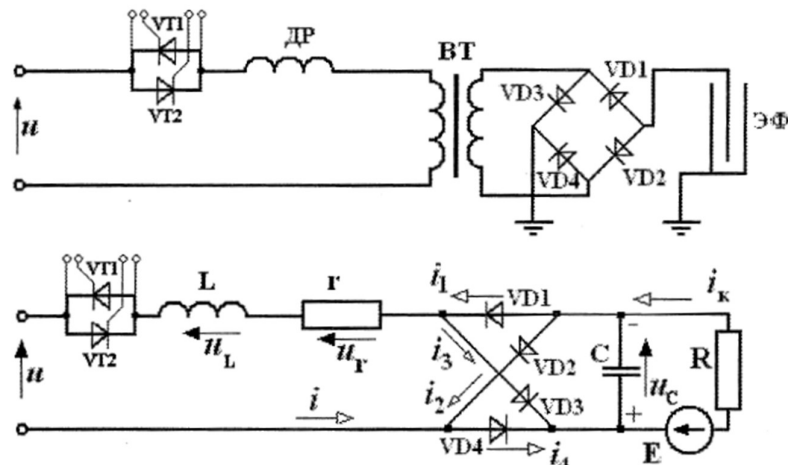


Рис.3. Принципиальная схема и схема замещения агрегата питания

Для упрощения расчета считается, что диоды VD1, VD4 и тиристор T1 открываются одновременно, так же, как и диоды VD2, VD3 и T2. Тиристоры T1 и T2 открываются поочередно, момент включения тиристоров равен углу регулирования  $\alpha$ . Напряжение  $u_c$  на конденсаторе к моменту открытия тиристоров равно  $u$ .

Основные соотношения для схемы, показанной на рис.3, можно записать в следующем виде:

- при открытом (в проводящем) состоянии тиристоров  $T_1$  и  $T_2$

$$i = i_k + i_c \quad (1)$$

$$i_k = \frac{u_c}{R} \quad (2)$$

$$i_k = \frac{u_c - E}{R} \quad (3)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (4)$$

$$L \frac{di}{dt} + ri + u_c = u, \quad (5)$$

где  $i_k$  - ток электрофильтра;  $R$  - сопротивление коронного разряда;  $C$  - конденсатор, учитывающий электрическую емкость электрофильтра;  $u_c$  - напряжение на электродах электрофильтра;  $u$  - питающее напряжение;  $E$  - эдс коронного разряда при пробое воздушного промежутка;

- в закрытом состоянии обоих тиристоров

$$i_k + i_c = 0 \quad (6)$$

$$u_c = E + Ri_k. \quad (7)$$

На рис.4 представлены временные диаграммы агрегата питания электрофильтров.

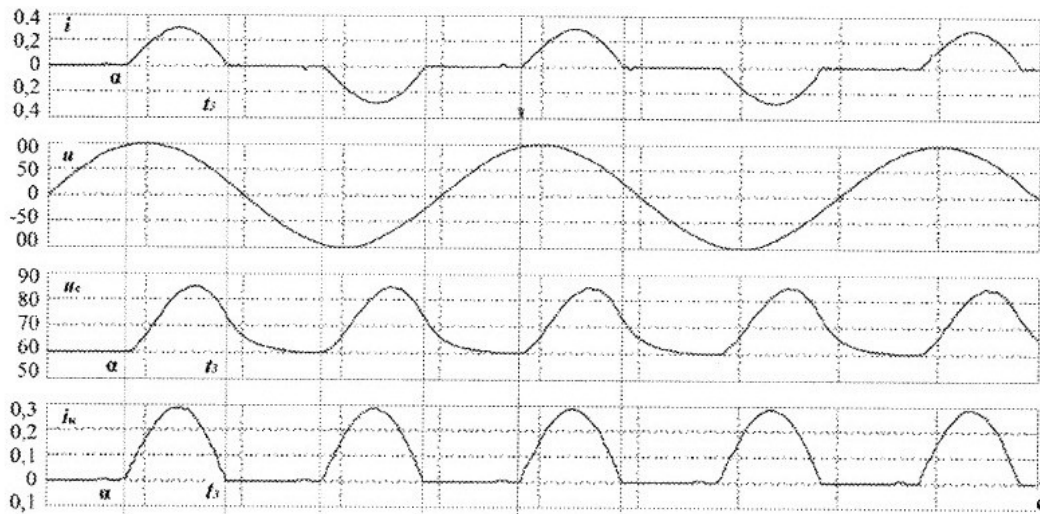


Рис.4. Временные диаграммы параметров агрегата питания

Как видно из рис.4, тиристоры  $VT_1$  и  $VT_2$  в момент времени  $t_3$  переходят в закрытое состояние, ток на коронирующем электроде и ток источника питания становятся равными нулю. Питающий ток имеет прерывистую форму кривой, и протекает в определённые промежутки времени, в это время конденсатор

заряжается, в моменты времени, когда ток равен нулю, конденсатор разряжается.

Как видно из рис.4, в проводящем состоянии тиристор Т1 находится в времени 0 до  $t_3$  при этом начальная фаза питающего напряжения определяется углом регулирования  $\alpha$ . В момент времени, соответствующему от 0 до  $\alpha$ , ток источника равен 0,  $u_c > E$ .

В момент времени от  $\alpha$  до  $t_3$  напряжение источника питания увеличивается до максимального значения, начинает возрастать ток электрофильтра и ток источника питания, увеличивается напряжение на конденсаторе, конденсатор заряжается. После того, как ток коронного разряда пройдет свое максимальное значение, напряжение на конденсаторе постепенно начнет уменьшаться, конденсатор начнет разряжаться.

В момент времени  $t_3$  тиристор VT1 переходит в закрытое состояние, ток на коронирующем электроде и ток источника питания становятся равными нулю,  $u_c = E$ , конденсатор перестает разряжаться на электрофильтр.

Питающий ток имеет прерывистую форму кривой, и протекает в определенные промежутки времени, в это время конденсатор заряжается, в моменты времени, когда ток равен нулю, конденсатор разряжается.

### Выводы

1. Регулятор напряжения в цепи агрегата питания позволяет поддерживать значение напряжения, близкому к коронному разряду.

2. Конденсатор, учитывающий электрическую емкость электрофильтра, будет разряжаться при условии  $u_c > E$  (условие возникновения коронного разряда) до момента, когда напряжение на конденсаторе  $u_c$  станет равным ЭДС коронного разряда  $E$ .

3. Система регулирования напряжения в агрегатах питания позволяет обеспечивать максимально возможное напряжение, близкое к напряжению пробоя воздушного промежутка, разделяющего электроды электрофильтра. Ввиду кратковременности пробоя коронного разряда в электрофильтрах, работающих на ионизации заряженных частиц, процесс очищения воздуха практически не останавливается, что приводит к значительному улучшению экологической обстановки при промышленном производстве.

### Библиографический список

1. **Алиев, Г.М.** Агрегаты питания электрофильтров / Г.М. Алиев, А.Е. Гоник.-М.:Энергия,1968-259 с.
2. **Бамдас, А.М.** Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов / А.М. Бамдас. - М.: Госэнергоиздат,1945.-48 с.
3. **Серебряков, А.С.** Осокин В.Л. Полупроводниковые источники питания аппаратов электронно-ионной технологии: монография / А.С. Серебряков. - Княгинино: НГИЭУ, 2015.-216 с.
4. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. - М.:Энергия, 1986-528 с.

**L.E.Roginskaya, Z.I.Yalalova, Yu.V.Rakhmanova, A. S. Gorbunov**

**DESIGN FEATURES OF VOLTAGE TRANSFORMER FOR AIR  
CLEANING FILTERS**

Ufa State Aviation Technical University, Russia

**Abstract:** The article discusses the principle of operation of a high-voltage transformer for a power supply unit for air purification filters. The design features of the transformer are presented. The principle of operation is considered and the analysis of the process of operation of power units based on a high-voltage transformer is given

**Key words:** transformer, rectifier, power supplies, power unit, electrostatic precipitators.

**References**

- [1] Aliev, G.M. *Power supply units for electrostatic precipitators*. Moscow.: Energy, 1968-259 p.
- [2] Bamdas, A.M. *Transformer-rectifier units for electrical gas cleaning*. Moscow.: State energy publishing house, 1945.-48s.
- [3] Serebryakov A.S., Osokin V.L. *Semiconductor power supplies for devices of electronic-ion technology: monograph*. Knyaginino: NGIEU, 2015.-216p.
- [4] Tikhomirov P.M. *Calculation of transformers*. Moscow.: Energy, 1986-528s.

В.В. Рожков, В.В. Федотов

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАЗНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОУРОВНЕВЫХ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ УРОВНЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

**Аннотация:** В статье приведен анализ различных топологий схем преобразователей с многоуровневыми автономными инверторами напряжения, проведенный средствами имитационного компьютерного моделирования. Проведением гармонического анализа произведена оценка качества выходных фазных и линейных напряжений многоуровневых автономных инверторов напряжения, предназначенных для использования как в приложении к электроприводу, так и для электроэнергетических задач.

**Ключевые слова:** многоуровневый автономный инвертор напряжения, частотный анализ, коэффициент гармоник, уровни, компьютерное моделирование.

Автономные инверторы напряжения (АИН) в настоящее время используются для различных приложений в сфере электроэнергетики и электротехники. Для частотно-регулируемого электропривода наиболее широко используется двухуровневый АИН в составе схемы «трехфазный неуправляемый выпрямитель (НВ) – звено постоянного тока с LC-фильтром и устройством торможения (УТ) – трехфазный АИН» (рис.1) [1]. Основным ключевым элементом для АИН является биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT, а технологией управления ключами в составе АИН является широтно-импульсная модуляция (ШИМ) выходного напряжения за счет соответствующей коммутации ключей. Параллельно с двухуровневыми вариантами АИН существуют и применяются чаще всего в высоковольтных вариантах схемы с многоуровневыми АИН (МАИН) [2], [3]. Из всего многообразия МАИН наиболее проработанным, выпускаемым промышленностью является трехуровневый вариант. Реже преобразователи выполняются с АИН в четырехуровневом варианте и более. Собственно многоуровневыми («multi-level» в зарубежных источниках) называют реализации схем с числом уровней свыше четырех. Например, МАИН с 6-ю уровнями выходного напряжения в каскадном исполнении показан на рис.2.

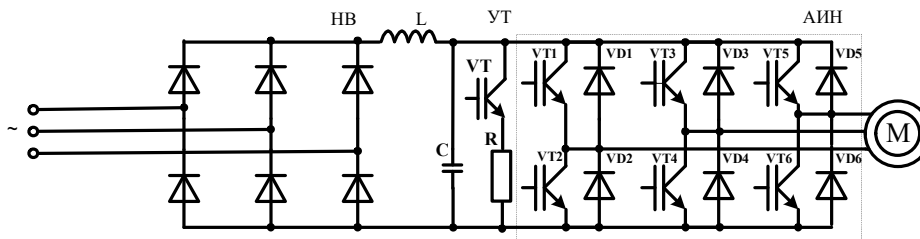


Рис. 1. Преобразователь частоты с двухуровневым АИН

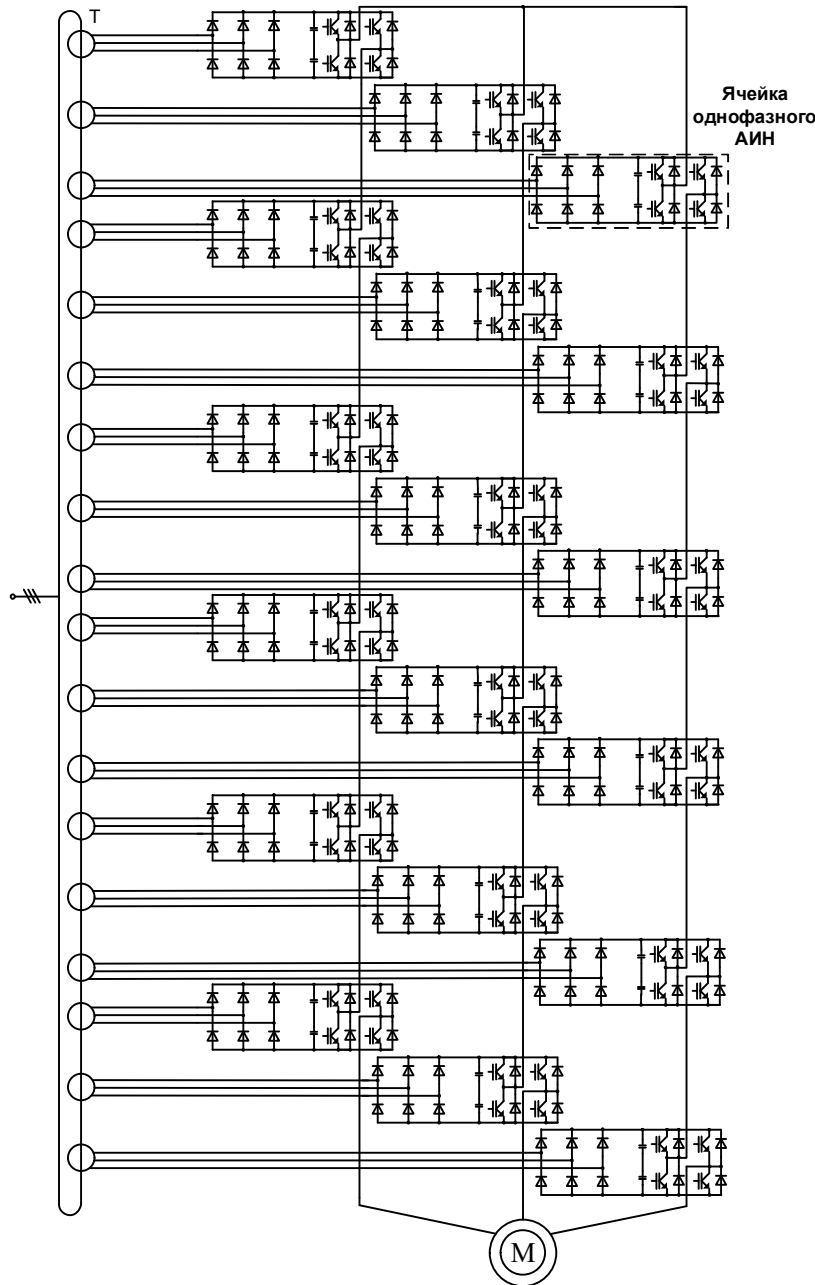


Рис. 2. Преобразователь частоты с МАИН

Безусловными преимуществами МАИН по сравнению с двухуровневым АИН является лучшее качество выходного напряжения (чем больше число уровней, тем ближе форма выходного напряжения АИН к идеальной синусоидальной форме). Для приводного двигателя такое напряжение более благоприятно, и таким образом, увеличиваются надежностные показатели (долговечность, ресурс) использования двигателей в составе преобразователей частоты с МАИН. Однако большое число уровней, как, например, на рис.2, вызывает вопросы по технико-экономической целесообразности применения схем МАИН.

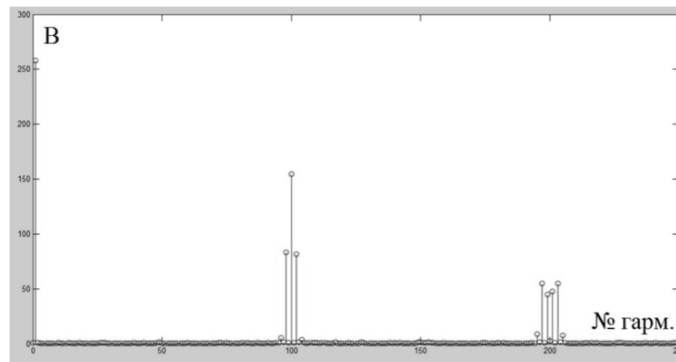
Целью настоящей статьи является анализ гармонического состава выходного напряжения МАИН с разным числом уровней для линейных напряжений, которыми питаются обмотки асинхронного двигателя в частотно-регулируемом приводе, и фазных напряжений для электроэнергетических применений (например, задач активной фильтрации сетевых искажений).

Необходимо отметить, что число упомянутых уровней относится к фазному напряжению выходной сети инвертора, тогда как в случае использования АИН для электропривода, нейтральный провод для нагрузки (асинхронного либо синхронного электродвигателя) не выводится, и нагрузка питается линейным напряжением. Число уровней линейного напряжения, являющегося алгебраической суммой фазных, не равно числу уровней фазного напряжения. Так, для схемы с двухуровневым АИН, число уровней в линейном напряжении равно 3, для трехуровневого АИН – 5 и т.д. Поэтому для электропривода важно именно число уровней и соответствующее качество линейного напряжения.

При применении схем МАИН для различных электроэнергетических задач, не связанных с электроприводом, например, для агрегатов бесперебойного питания и т.д., основное значение имеет фазное напряжение, так как нейтраль в этих схемах выведена, и к схеме могут быть подключены однофазные нагрузки. Представляется целесообразным средствами компьютерного моделирования провести анализ выходного напряжения (как фазного, так и линейного) для схем АИН с различным числом уровней, по результатам которого определить рациональное число уровней МАИН с учетом требований соответствующих нормативных документов по качеству электрической энергии для сетей общего назначения и для питания электродвигателей от преобразователей частоты [4], [5].

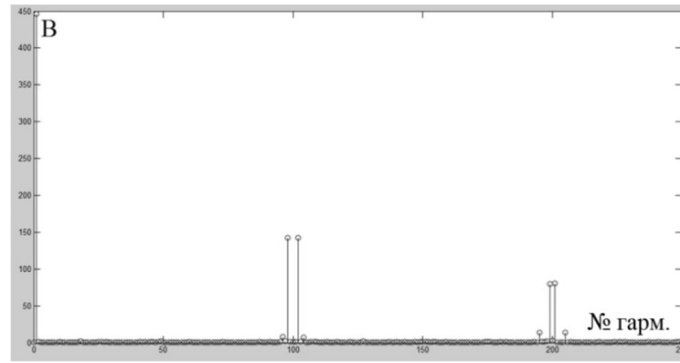
Для решения поставленной задачи разработан пакет моделей в MatLab для АИН в двух-, трех-, четырех- и пятиуровневом исполнении.

По результатам моделирования получены гистограммы частотного анализа фазного и линейного напряжения инверторов с разным числом уровней. Например, для двухуровневого АИН гистограмма частотного анализа фазного напряжения показана на рис.3.а, а для линейного напряжения – на рис.3.б. Тогда как для МАИН, например, с пятью уровнями, аналогичные гистограммы показаны на рис.4,а и рис.4,б.



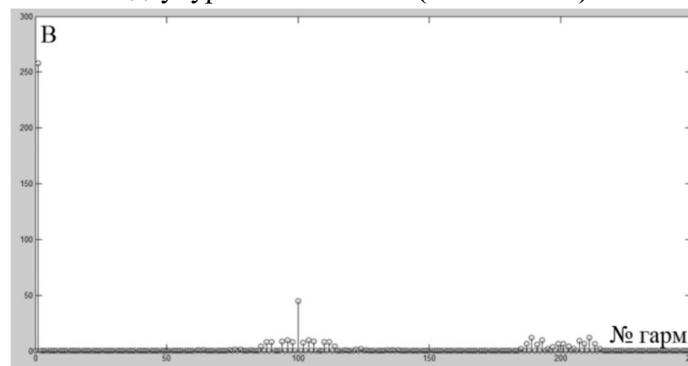
а)

**Рис. 3. Гистограммы: а) частотного анализа фазного напряжения двухуровневого АИН (Начало)**

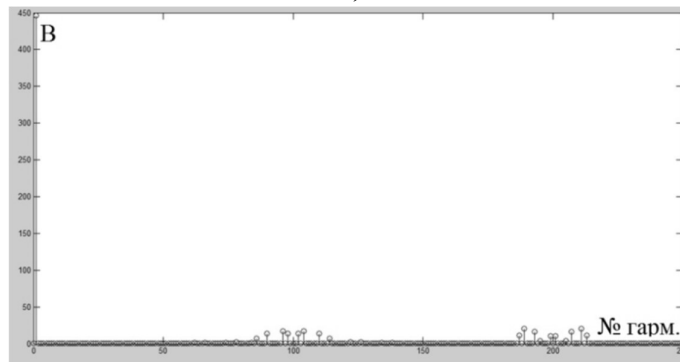


б)

**Рис. 3. Гистограммы:** б) частотного анализа линейного напряжения двухуровневого АИН (Окончание)



а)



б)

**Рис. 4. Гистограммы:** а) частотного анализа фазного напряжения пятиуровневого АИН; б) частотного анализа линейного напряжения пятиуровневого АИН

Основным показателем качества напряжения сети вообще и выходной сети инверторов в частности является коэффициент гармоник (аббревиатура в международных стандартах THD – total harmonic distortion). Причем нормативная величина THD по [4] не должна превышать у потребителя значение в 5%. Результаты проведенного анализа качества выходного напряжения АИН с оценкой THD сведены в табл.1.

Экстраполяционная кривая построена на основании значений табл.1 для THD линейного напряжения. Видно, что требуемое THD=5% для линейного напряжения получается при семиуровневой топологии АИН. Аналогичный



анализ, проведенный для фазного напряжения, показывает THD=5% уже для восьмиуровневого АИН.

Таблица 1

Сопоставление коэффициента THD для двухуровневого АИН и МАИН с разным числом уровней

АИН	THD фазного напряжения, %	THD линейного напряжения, %
Двухуровневый	96,1	64,8
Трехуровневый	50,2	33,2
Четырехуровневый	34,0	21,9
Пятиуровневый	25,8	15,9

Видно существенное снижение THD с ростом числа уровней МАИН, однако даже для пятиуровневого АИН это значение еще значительно превышает нормативную величину.

Для решения задачи о нахождении необходимого числа уровней МАИН можно провести экстраполяционный анализ зависимости числа уровней инвертора в функции значения THD (см. рис.5).

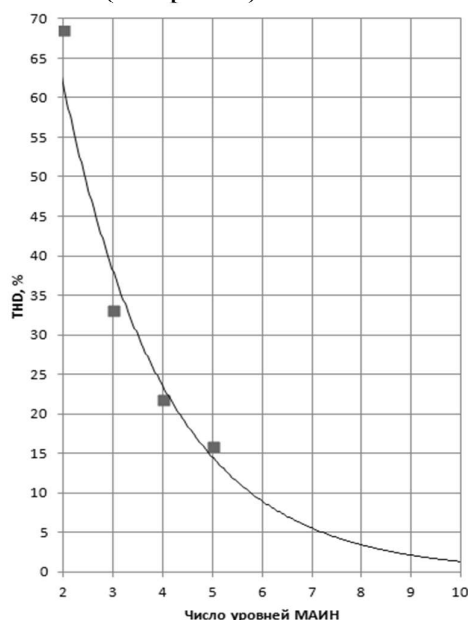


Рис. 5. Экстраполяция числа уровней МАИН в функции THD, %

Экстраполяционная кривая построена на основании значений табл.1 для THD линейного напряжения. Видно, что требуемое THD=5% для линейного напряжения получается при семиуровневой топологии АИН. Аналогичный анализ, проведенный для фазного напряжения, показывает THD=5% уже для восьмиуровневого АИН.

Например, для электропривода с МАИН это означает, что при подключении к выходу семиуровневого АИН электродвигателя общепромышленного исполнения, снижение долговечности машины из-за негативного влияния ШИМ на

изоляцию не произойдет. Дальнейшие рассуждения предполагают уже проведение экономического анализа полученных результатов. Наличие семи или восьми уровней может оказаться экономически нецелесообразным при общем проектировании МАИН, поэтому необходим комплексный подход, учитывающий не только обеспечение требуемых стандартов качества электроэнергии, но и экономическую целесообразность. Например, анализ стоимости собственно силовой части МАИН без системы управления показывает, что использование силовой схемы восьмиуровневого инвертора в два раза дороже, чем использование схемотехники пятиуровневого АИН.

Последнее позволяет сделать компромиссный вывод о том, что применение пятиуровневого АИН с дополнительным оборудованием (например, небольшими синус-фильтрами) позволит без чрезвычайного удорожания схемы получить наилучшие показатели по критерию «качество выходного напряжения – цена силовой части инвертора», обеспечив требуемые в [4] и [5] THD=5% для фазных и линейных напряжений.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2020-0019.

#### Библиографический список

1. Данилов, П.Е. Управление частотно-регулируемым электроприводом. Конспект лекций по курсу «Специальные разделы теории электропривода» [Текст]: конспект лекций/ П.Е. Данилов, К.К. Крутиков, В.В. Рожков. – 2-е изд., испр., - Смоленск, 2012. – 100 с.
2. Ушаков, А. С. Исследование современных методов энергосберегающего управления асинхронным электроприводом / А. С. Ушаков, А. Р. Колганов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2012. - Вып. 2. - С. 56-62.
3. A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabalza, M. A. R. Vidal, and P. Izurza-Moreno, “New hexagonal three-phase voltage-source converter topology for high-power applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 30–39, 2015.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения 2014-07-01. // [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>
5. ГОСТ Р 55136 – 2012/IEC/TS 60034-25:2007. Машины электрические вращающиеся. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей. Введен 23.11.2012. М.: Стандартинформ, 2014.

V.V. Rozhkov, V.V. Fedotov

## HARMONIC ANALYSIS OF PHASE AND LINE VOLTAGES OF MULTI-LEVEL VOLTAGE SOURCE INVERTERS WITH DIFFERENT NUMBER OF LEVELS FOR ELECTRIC DRIVE AND ELECTRIC POWER ENGINEERING

Branch of the National Research University MPEI in Smolensk  
Smolensk, Russia

**Abstract:** The article provides an analysis of various topologies of converter circuits with multi-level voltage source inverters, carried out by means of computer simulation. Conducting a harmonic analysis, the quality of the output phase and line voltages of multilevel voltage source inverters, intended for use both in the application to an electric drive and for electric power tasks, was assessed.

**Key words:** multi-level voltage source inverters, frequency analysis, harmonic distortion, levels, computer simulation.

### References

- [1] Danilov, P.Ye. Upravleniye chastotno-reguliruyemym elektroprivodom. Konspekt lektsiy po kursu «Spetsial'nyye razdely teorii elektroprivoda [Special sections of the theory of electric drive]»: konspekt lektsiy [lecture notes] / P.Ye. Danilov, K.K. Krutikov, V.V. Rozhkov. – 2-ye izd., ispr., - Smolensk, 2012. – 100 p. (in Russian)
- [2] Ushakov, A. S. Issledovaniye sovremennykh metodov energosberegayushchego upravleniya asinkhronnym elektroprivodom [Research of modern methods of energy-saving control of an asynchronous electric drive] / A. S. Ushakov, A. R. Kolganov // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University]. - 2012. - Vyp. 2. - pp. 56-62 (in Russian)
- [3] A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabalza, M. A. R. Vidal, and P. Izurza-Moreno, “New hexagonal three-phase voltage-source converter topology for high-power applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 30–39, 2015.
- [4] GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Date of introduction 2014-07-01. // [Electronic resource] Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (in Russian)
- [5] GOST R 55136 - 2012 / IEC / TS 60034-25: 2007. Mashiny elektricheskkiye vrashchayushchiyesya. Rukovodstvo po konstruktsii i kharakteristikam mashin peremennogo toka, spetsial'no prednaznachennykh dlya pitaniya ot preobrazovateley. [Rotating electrical machines. A guide to the design and characteristics of AC machines specially designed for converter supply]. Introduced on 23.11.2012. M.: Standartinform, 2014. (in Russian)

УДК 621.314

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_40

**Н.А. Садовский, Н.Н. Вихорев, Д.А. Алешин****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАГРУЗКИ  
НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КВАЗИРЕЗОНАНСНОМ  
ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** в статье приводится схмотехническое решение преобразователя с дополнительным управляемым резонансным контуром, обеспечивающим коммутацию силовых ключей при нулевом напряжении, что позволяет приблизить динамические потери при переключениях силовых транзисторов к нулевой величине. С помощью имитационной модели проведены исследования влияния параметров выходного фильтра преобразователя и нагрузки на переходные процессы в резонансной цепи, что позволило определить границы применения предлагаемого решения. Приведены временные диаграммы, наглядно демонстрирующие отклонения параметров коммутации при формировании синусоидального выходного напряжения.

**Ключевые слова:** квазирезонансный преобразователь, мягкая коммутация, переходный процесс, динамические потери, *IGBT*, коэффициент полезного действия.

В настоящее время развитие силовой полупроводниковой техники позволяет использовать преобразователи с высокой частотой переключения силовых транзисторов (десятки и сотни килогерц), что снижает массогабаритные показатели электроприборов, посредством уменьшения параметров электромагнитных (и других реактивных) элементов, таких как индуктивные дроссели, трансформаторы, конденсаторы и т.д.

Недостатком высокой частоты модуляции является увеличение динамических потерь в силовых ключах, возникающих при переходе из «открытого» в «закрытое» состояние и наоборот, при ненулевых величинах тока и напряжения. Упомянутая разновидность переключения носит название «жесткая» коммутация [1].

Высокие значения динамических потерь накладывают повышенные требования к охлаждению полупроводниковых элементов, а также могут ограничивать их электрические возможности.

Устранить упомянутые проблемы может быть достигнуто с помощью схмотехнических решений, реализующих процесс «мягкой» коммутации ключей, при которой формируются такие условия переключения, как при «нулевом токе или напряжении» (*Zero Voltage Switching, Zero Current Switching*). Нулевая величина одного из двух указанных параметров приводит к уменьшению динамических потерь или полностью их устраняет.

«Мягкая» коммутация применяется во многих устройствах, например в преобразователях постоянного напряжения, дополненных квазирезонансными контурами. Приведенная на рис. 1 принципиальная схема понижающего преобразователя модифицирована путем введения колебательного контура  $L_1 C_1$ , обеспечивающего переключение транзистора при нулевом токе, что позволяет значительно снизить коммутационные потери.

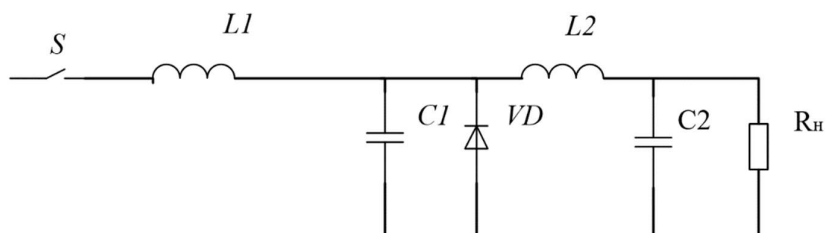


Рис. 1. Схемотехническое решение для уменьшения потерь

Схожее схемотехническое решение применяется в преобразователях постоянного напряжения в переменное (рис. 2). Несмотря схожий принцип действия, обеспечивается переключение силовых ключей при нулевом напряжении, что также позволяет снизить коммутационные потери [3].

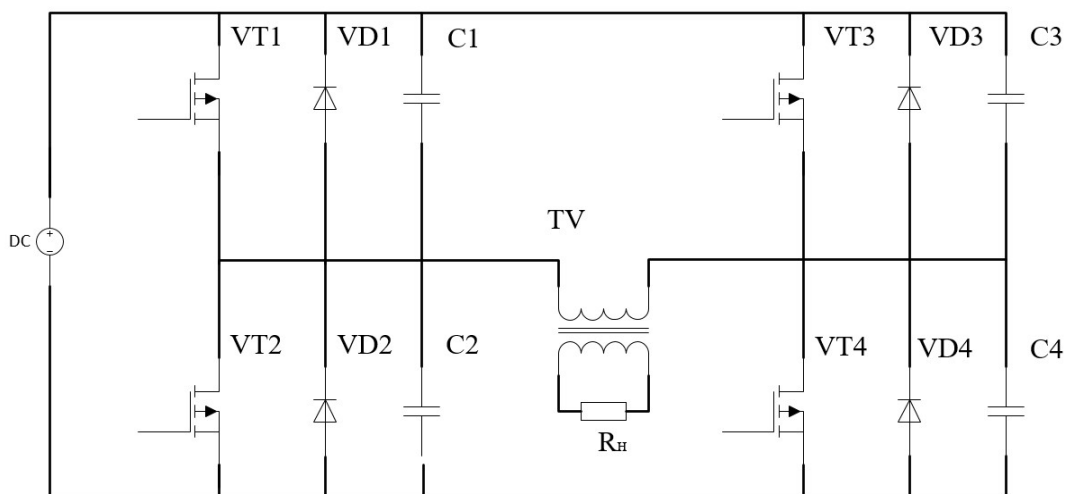


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя, реализующего снижение потерь на переключение

Недостаток приведенных решений и различных их модификаций заключается в жесткой взаимосвязи частоты работы ключей и параметров колебательного контура, что затрудняет регулирование параметров выходного напряжения.

Предлагаемый в статье подход к реализации полупроводникового инвертора позволяет формировать выходное напряжение с параметрами, регулируемые в широких пределах, обеспечивая при этом процесс «мягкого» переключения транзисторов на всем диапазоне регулирования (рис. 3).

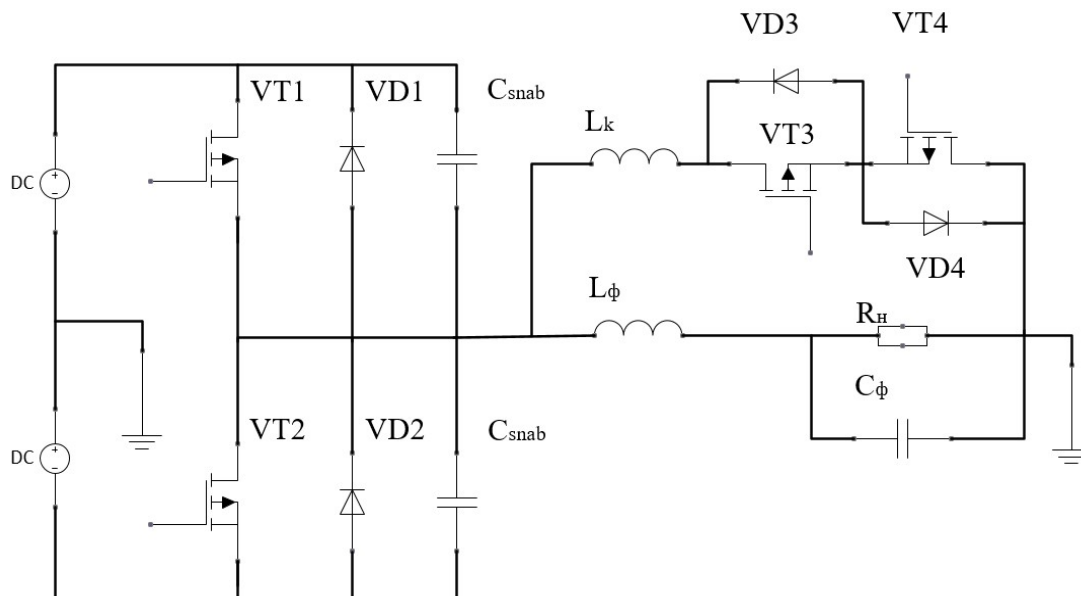


Рис. 3. Принципиальная схема инверторного преобразователя с «мягкой» коммутацией

На рис. 4 приведены диаграммы переключения транзисторов. Включение транзистора производится в момент, когда напряжение на нем плавно снижается до нулевой величины посредством колебательного процесса в резонансной цепи.

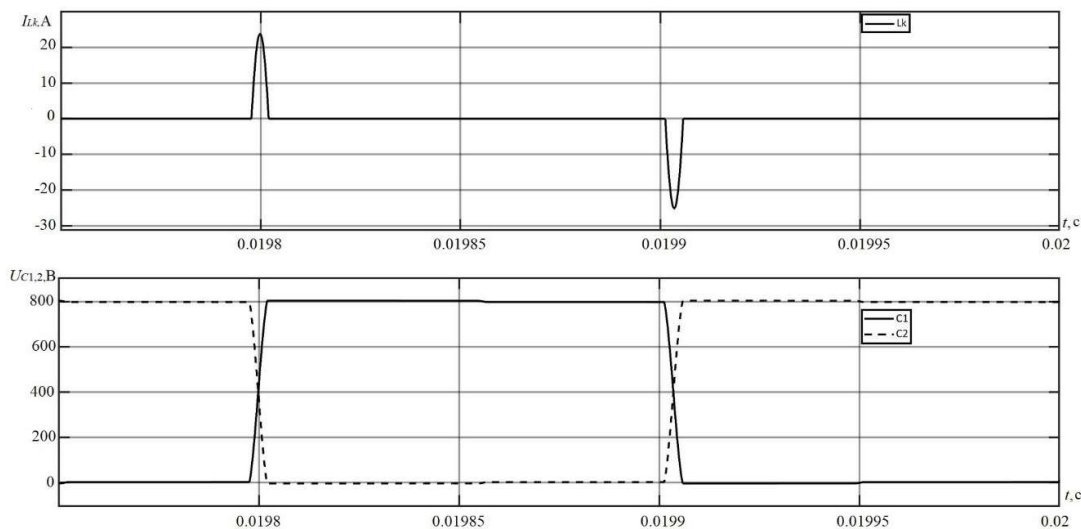


Рис. 4. Формирование траектории переключения транзисторов

Длительность полупериод тока  $T_{рез}$  коммутационного контура, образованного коммутирующей индуктивностью  $L_k$  и снабберными конденсаторами  $C_{snab}$ , при работе преобразователя на «холостом ходу» определяется соотношением:

$$T_{рез} = \pi \sqrt{\frac{L_k C_{snab}}{2}} . \quad (1)$$

При выполнении расчетов следует учитывать, что резонансный контур образован системой из одного индуктивного дросселя и двух конденсаторов, включенных последовательно друг с другом, а один из конденсаторов в начальный момент коммутации заряжен до двукратного напряжения питания, что обуславливает отличие расчетной длительности переходного процесса от классической формулы резонанса [2].

Подключение к преобразователю резистивной нагрузки без промежуточных фильтрующих цепей приводит к снижению добротности колебательного контура и нарушению процесса «мягкой» коммутации, что в соответствии с процессом переключения транзисторов будет происходить при ненулевых напряжениях, поэтому эксплуатация преобразователя в таком режиме рекомендуется только при малых величинах нагрузки.

Введение в конструкцию преобразователя фильтрующего  $LC$ -звена приводит к некоторым изменениям в работе энергосистемы.

На рис. 5 приведена упрощенная принципиальная схема преобразователя, поясняющая протекание токов в положительный полупериод выходного напряжения при переключении транзисторов с верхнего на нижний (рис. 5, а) и с нижнего на верхний (рис. 5, б). Сумма токов перезаряда  $i_C$  снабберных конденсаторов  $C_{snab}$  численно равна сумме токов индуктивного дросселя фильтра  $i_L$  и коммутационного дросселя  $i_k$ . При выключении верхнего транзистора и включении нижнего все упомянутые токи сонаправлены (рис. 5, а).

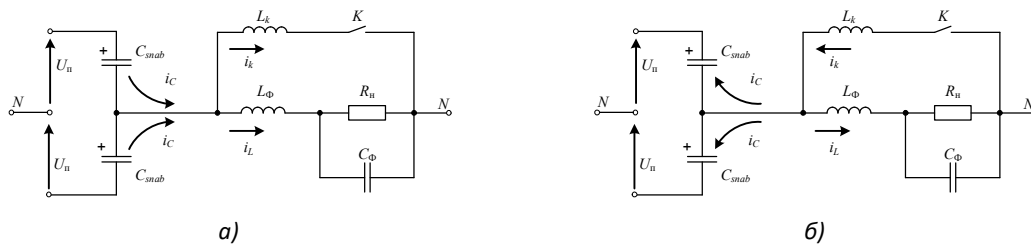


Рис. 5. Направления токов при переключении на нижний транзистор

В этом случае ток коммутационного дросселя, необходимый для обеспечения «мягкого» переключения, снижен на величину тока фильтра, протекающего в системе в данный момент времени, что ускоряет процесс коммутации и сводит к минимуму токовую нагрузку со вспомогательного ключа  $K$ .

Несколько иначе происходит процесс переключения с нижнего транзистора на верхний (рис. 5, б). Токи дросселя фильтра и коммутационного дросселя в данном случае направлены встречно друг другу, а значит для осуществления процесса переключения резонансная цепь должна пропустить величину тока, текущее значение которого превышает значение тока в цепи фильтра. Процесс нарастания тока в резонансной цепи затягивается на величину, пропорциональную отклонению номинального коммутационного тока в начальный момент переключения.

На рис. 6 приведены диаграммы изменения длительности и амплитуды тока переходного процесса при формировании синусоидальной формы выходного напряжения.

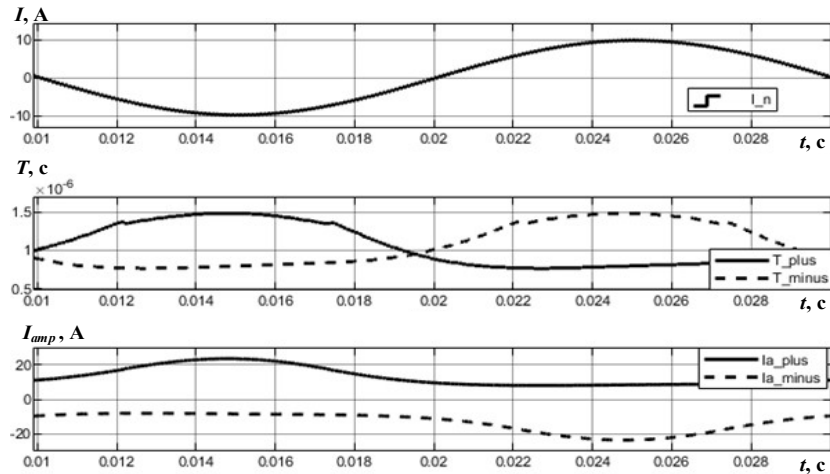


Рис. 6. Диаграммы изменения параметров процесса переключения транзисторов

В зависимости от параметров элементов длительность и амплитуда тока коммутационного дросселя могут кратно изменять свои величины. Данное обстоятельство следует учитывать при выборе полупроводниковых элементов, установленных в цепи резонансного контура. Также следует учесть, что ток контура «мягкой» коммутации может превышать ток индуктивного дросселя фильтра. Однако длительность импульса тока мала по сравнению с длительностью электропроводности основных силовых ключей, а величина перегрузки составляет десятые доли тока нагрузки и значительно снижается с уменьшением величины пульсаций тока дросселя [4].

Таким образом, предлагаемое схемотехническое решение позволяет проектировать инверторные преобразователи с минимальными электрическими потерями и сохранением возможности регулирования параметров выходного напряжения, что может быть актуальным для производства как автономных источников питания, так и регуляторов параметров качества электроэнергии высокой мощности.

#### Библиографический список

1. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие/ М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
2. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учебник. Ч. 2 / Г.С. Зиновьев - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2000 – 197 с.
3. Zhang, H. Analysis and Compensation of Dead-Time Effect of a ZVT PWM Inverter Considering the Rise- and Fall-Times / H. Zhang, B. Kou, L. Zhang / Appl. Sci. 2016, 6, 344. (doi:10.3390/app6110344)
4. Wang, S. Induction-Heated Cooking Appliance Using New Quasi-Resonant ZVS-PWM Inverter With Power Factor Correction/ S. Wang, K. Izaki, I. Hirota, H. Yamashita, H. Omori / IEEE vol. 34, №4, July/August, pp. 705-712, 1998.



**N.A. Sadovskiy, N.N. Vihorev, D.A. Aleshin**

**VOLTAGE INVERTER WITH CONTROLLED  
SOFT SWITCHING CIRCUIT**

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

**Abstract:** The article deals with schematic solution of a converter with an auxiliary controlled resonant circuit that provides switching of power switches at zero voltage, which makes it possible to bring dynamic losses when switching power transistors closer to zero. By dint of simulation model, studies were carried out of the influence of the parameters of the output filter of the converter and the load on transient processes in the resonant circuit, which made it possible to determine the limits of application of the proposed solution. Timing diagrams are given that clearly demonstrate the deviations of the switching parameters during the formation of a sinusoidal output voltage.

**Key words:** quasi-resonant converter, soft switching, transition process, dynamic losses, IGBT, efficiency.

**References**

- [1] M.V. Gelman, M.M. Dudkin, K.A. Preobrazhinskiy “Preobrasovatel'nay tekhnika [converting technology]”, Tutorial. Chelyabinsk, pp. 425, 2009 (in Russian)
- [2] G.S. Zinoviev, I. “Osnovi silovoi elektroniki [power electronic fundamental]”, Tutorial. Novosibirsk, pp. 197, 2000 (in Russian)
- [3] Zhang, H. Analysis and Compensation of Dead-Time Effect of a ZVT PWM Inverter Considering the Rise- and Fall-Times / H. Zhang, B. Kou, L. Zhang / Appl. Sci. 2016, 6, 344. (doi:10.3390/app6110344)
- [4] Wang, S. Induction-Heated Cooking Appliance Using New Quasi-Resonant ZVS-PWM Inverter With Power Factor Correction/ S. Wang, K. Izaki, I. Hirota, H. Yamashita, H. Omori / IEEE vol. 34, №4, July/August, pp. 705-712, 1998.

УДК 621.316.726

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_46

**В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев****ПРИМЕНЕНИЕ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** Рассмотрены способы построения технических решений систем управления полупроводниковыми преобразователями на основе эталонного сигнала. Показано, что использование представленных способов при формировании выходного напряжения обеспечивает адаптацию к вариации параметров напряжения источника электроэнергии.

**Ключевые слова:** эталонный сигнал, блок памяти, отклонение параметров напряжения.

**Введение**

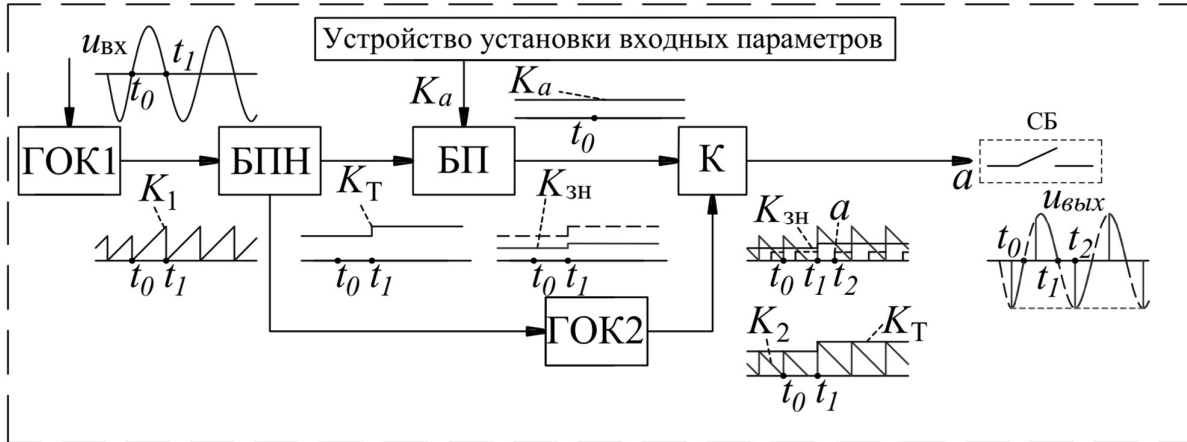
Качество электрической энергии на выходе полупроводникового преобразователя (ПП) определяется в зависимости от режимов работы судна и природно-навигационных условий, параметров потребителей электроэнергии и особенности работы судовой электроэнергетической системы [1-3].

Восприимчивость системы управления ПП к гармоническим искажениям и к отклонению параметров напряжения источника электроэнергии от номинальных значений приводит к снижению надежности и эффективности работы ПП, а также к изменению амплитуды, частоты и формы выходного напряжения. При воздействии гармонических искажений нарушается точность управления и увеличивается несимметрия углов коммутации [3]. Отклонение частоты напряжения приводит к отклонению углов управления и коммутации относительно перехода сетевого напряжения через нулевое значение. Несимметрия напряжений возбуждает в преобразователях частоты дополнительные гармонические искажения и значительно ухудшаются режимы работы многофазных преобразователей.

Отсутствие адаптации систем управления к изменению параметров источника электроэнергии является одной из основных причин снижения эффективности большинства технических решений, разработанных для использования в промышленных сетях. В связи с этим разработка ПП, способных адаптироваться к гармоническим искажениям и к нестабильным параметрам напряжения электрической энергии, является актуальной задачей. Одним из вариантов решения данной задачи является разработка адаптивных систем управления ПП с использованием эталонных сигналов. Формирование управляющих импульсов на вентили ПП с использованием эталонных сигналов осуществляется на основе коррекции опорного сигнала (кода) в зависимости от параметров напряжения или при сравнении входного напряжения сети с эталонным сигналом (кодом).

## Способы построения адаптивных систем управления на основе эталонных сигналов

Реализация первого способа (рис. 1), основана на коррекции опорного кода в зависимости от периода сетевого напряжения.



**Рис. 1. Способ коррекции опорного кода:**

ГОК1, ГОК2 – первый и второй генератор опорного кода; БПН – блок вычисления периода напряжения; БП – блок памяти; К – компаратор; СБ – силовой блок полупроводникового преобразователя

По адресам БП записываются коды  $K_{3H}$  задающего напряжения (рис. 2, опорные коды  $K_{3H}$  задающего напряжения представлены в виде весового кода [4]), соответствующие периоду  $T_c$  питающего напряжения и заданному углу управления  $\alpha$ :

$$K_{3H} = K_T / K_\alpha, \quad (1)$$

где  $K_T$  –  $i$ -тый адрес по первой координате, который соответствует коду периода питающего напряжения;  $i$  – номер адреса по первой координате  $i=0, 1, 2 \dots n$ , при этом  $T_c^{(0)}$  соответствует  $T_c = T_{ном} - \Delta T$ , а  $T_c^{(n)}$  соответствует  $T_c = T_{ном} + \Delta T$ ;  $K_\alpha$  –  $j$ -тый адрес по второй координате  $K_\alpha = \pi/\alpha = 180^\circ/\alpha$ ;  $j$  – номер адреса по второй координате  $j=0, 1, 2 \dots m$ , при этом  $K_\alpha^{(0)}$  соответствует  $\alpha^{(0)} = 180^\circ/m$ , а  $K_\alpha^{(m)}$  соответствует  $\alpha^{(m)} = 180^\circ$  эл;  $T_{ном}$  – номинальное значение периода напряжения, с;  $T_c$  – период напряжения сети, с;  $\Delta T$  – отклонение периода, с.

Коррекция осуществляется следующим образом. В моменты времени перехода напряжения  $u_{вх}$  через нулевое значение на выходе БПН формируется код  $K_T$ , соответствующий значению периода входного напряжения. В зависимости от кодов  $K_T$  и  $K_\alpha$  на выходе БП появляется код  $K_{3H}$ , который соответствует текущему периоду напряжения и заданному углу управления  $\alpha$ .

При равенстве кода  $K_{3H}$  и кода  $K_2$ , формирование которого обеспечивает ГОК2 в зависимости от значения кода  $K_{Tc}$ , на выходе компаратора К появляется управляющий сигнал. Этот сигнал далее поступает на выходной формирователь системы управления, который открывает вентиль СБ (на схеме не показаны) в

моменты времени, соответствующие заданному углу управления  $\alpha$  и мгновенному значению питающего напряжения  $u_{\text{ВХ}}$ .

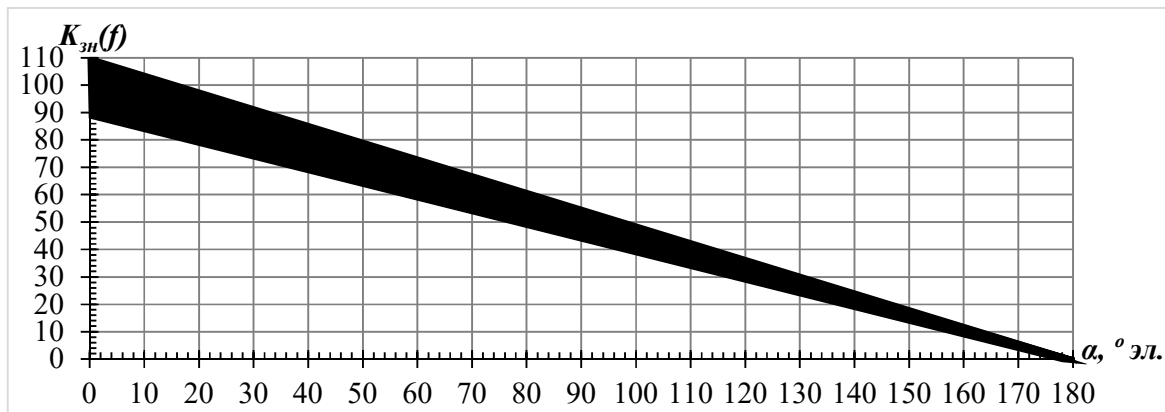


Рис. 2. Пример области  $K_{3H}$  в блоке памяти

Если к моменту времени  $t_0$  (рис. 1), период питающего напряжения  $u_{\text{ВХ}}$  изменился, например, увеличился, то к моменту времени  $t_1$  на выходе БПН будет сформирован больший код, который поступит на вход адреса первой координаты БП. На выходе блока памяти появится больший код  $K_{3H}$ . Равенство кодов  $K_{3H}$  и  $K_\alpha$  наступит позже. Однако управляющий импульс на выходе К появится при прежнем угле управления  $\alpha$  (момент времени  $t_2$ ), которому, как и прежде, соответствует мгновенное значение  $u_{\text{ВЫХ}}$  питающего напряжения  $u_{\text{ВХ}}$ .

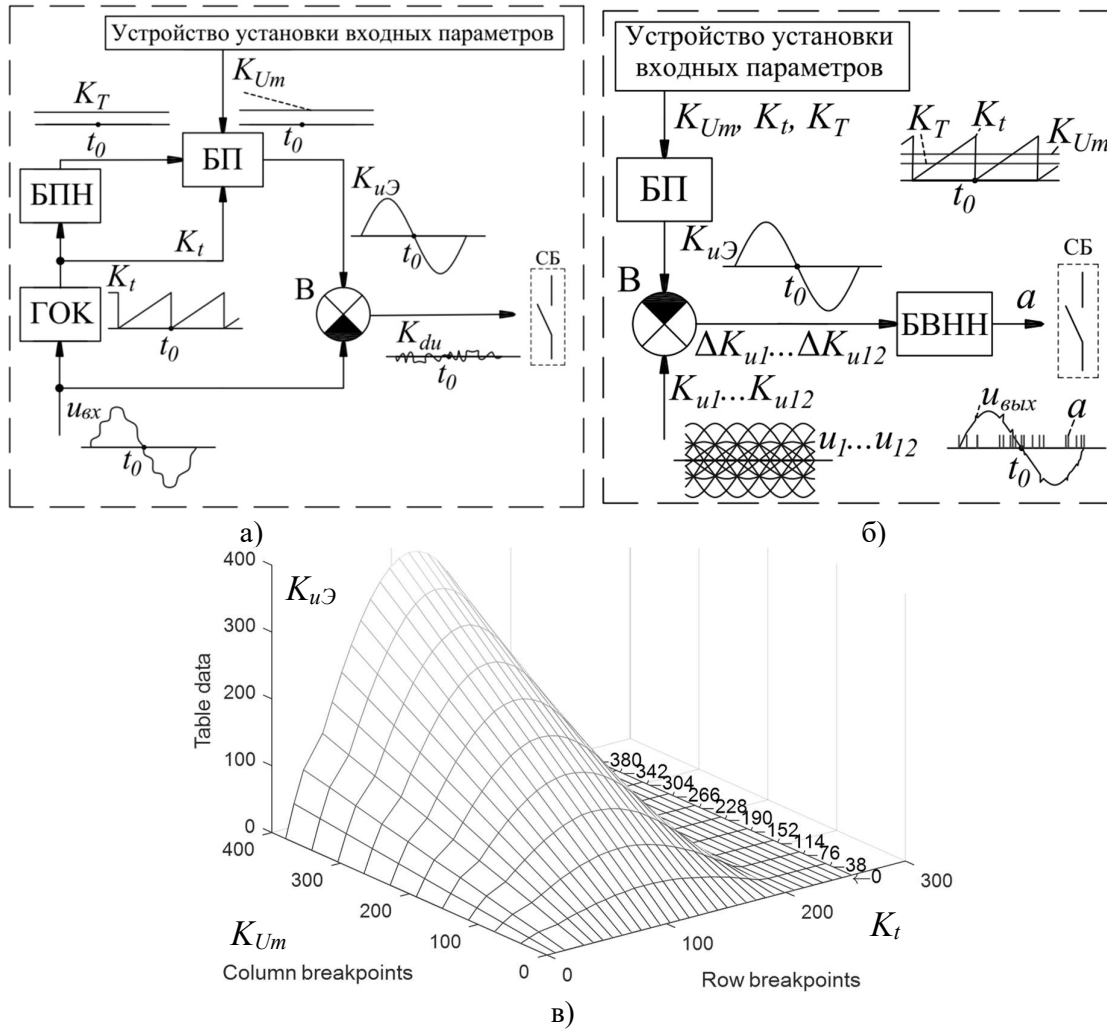
Таким образом, коррекция опорного кода позволяет стабилизировать угол управления в условиях нестабильности частоты напряжения, которая наблюдается при питании от источника электроэнергии ограниченной мощности. Данный способ использован при разработке цифрового фазосмещающего устройства, обеспечивающего плавное формирование угла управления и его высокую стабильность при нестабильности частоты питающего напряжения, для систем управления ПП [4, 5].

При втором способе (рис. 3, а, б) формирование управляющих импульсов основывается на разности питающего напряжения и эталонного сигнала, сформированного в блоке памяти. В этом случае для измерения параметров напряжения наиболее перспективным является использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые характеризуются высокой чувствительностью, малой погрешностью измерений и отсутствием субъективной ошибки отсчета результатов измерений.

При формировании эталонного сигнала (рис. 3, в) по адресам блока памяти записываются коды  $K_{uЭ}$  мгновенных значений напряжения  $u_{\text{ВХ}}$ :

$$K_{uЭ} = u_3(t) / \Delta U, \quad (2)$$

$$\text{где } u_3(t) = U_m \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right). \quad (3)$$



**Рис. 3. Способ сравнения напряжения сети с эталонным сигналом:**

а – формирование эталонного сигнала в зависимости от входного напряжения; б – независимое формирование эталонного сигнала; в – пример области  $K_{uЭ}$  в блоке памяти ГОК – генератор опорного кода; БПН – блок вычисления периода напряжения; БП – блок памяти; В – вычислитель; БВНН – блок выбора наименьшего напряжения; СБ – силовой блок полупроводникового преобразователя

Первой координатой адреса блока памяти является код  $K_{Um}$  амплитуды эталонного напряжения, который связан выражением:

$$K_{Um} = U_m / \Delta U_{АЦП}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_{АЦП}$  – ступень квантования АЦП.

Код  $K_t$  текущего времени  $t$  является второй координатой адреса блока памяти. Код  $K_T$  половины периода  $T_c/2$  выходного напряжения является третьей координатой адреса блока памяти.

Напряжение, подаваемое на вход устройства, через АЦП поступает на вход вычитателя В. На выходе ГОК (рис. 3, а) появляется код  $K_t$  текущего времени; он формируется на основе напряжения  $u_{вх}$  и сбрасывается в момент перехода питающего напряжения через ноль. Код  $K_t$  текущего времени поступает на вход второго адреса БП. По окончании полупериода с приходом очередной полуволны напряжения  $u_{вх}$  блок БПН формирует код  $K_T$  полупериода напряжения  $u_{вх}$ , который связан с периодом  $T_c$  напряжения  $u_{вх}$ . С выхода БПН код  $K_T$  полупериода напряжения  $u_{вх}$ , поступает на вход третьего адреса (адреса периода) блока памяти. На первый вход БП поступает код  $K_{Um}$ , который задает амплитуду эталонного сигнала.

В зависимости от текущего времени, амплитуды и периода напряжения  $u_{вх}$  на выходе БП появляется соответствующий код  $K_{uЭ}$  эталонного напряжения, который поступает на вычитатель. На выходе вычитателя появляется код  $K_{du}$  разности или отклонения мгновенного значения напряжения нагрузки от эталонного напряжения:

$$K_{du} = K_{Эu} - K_{uвх}. \quad (5)$$

В результате в любой момент времени формируется код  $K_{du}$ , который поступает на вход СБ. Силовой блок на основании кода  $K_{du}$  корректирует мгновенное значение напряжение сети  $u_{вх}$ , приближая его форму к идеальной синусоиде. Данный способ был использован при разработке вольтодобавочных устройств, обеспечивающих регулирование напряжения генераторов трехфазного переменного тока автономных источников электрической энергии [6].

При формировании кода  $K_{uЭ}$  эталонного напряжения независимо от напряжения  $u_{вх}$  (рис. 3, б) осуществляется следующим образом. С выхода задающего устройства установки выходных параметров на вход первого адреса БП поступает код амплитуды выходного напряжения  $K_{Um}$ , а на вход второго адреса – код периода выходного напряжения  $K_T$ . На третий вход БП поступает код, характеризующий текущее время  $K_t$ . На выходе БП появляется код  $K_{uЭ}$  эталонного напряжения.

С выхода БП код  $K_{uЭ}$  поступает на отрицательный вход вычитателей для каждого сетевого напряжения, на первых входах которых присутствуют коды  $K_{u1}$ ,  $K_{u2}$ , ...  $K_{u12}$ , соответствующих напряжений  $U_1$ ,  $U_2$ , ...  $U_{12}$ . Напряжения  $U_1$ ,  $U_2$ , ...  $U_{12}$  получаются из трехфазной системы напряжений с выведенной нулевой точкой, имеющие фазовый сдвиг  $30^\circ$  эл. На выходах вычитателей появляются коды модуля отклонения  $\Delta K_{u1}$ ,  $\Delta K_{u2}$ , ...  $\Delta K_{u12}$  соответствующих мгновенных напряжений  $U_1$ ,  $U_2$ , ...  $U_{12}$  питающей системы и кода эталонного выходного напряжения  $K_{uЭ}$ . Эти коды отклонений  $\Delta K_{u1}$ ,  $\Delta K_{u2}$ , ...  $\Delta K_{u12}$  попарно подаются на входы БВНН для выявления в каждой паре напряжения с наименьшим отклонением, т. е. предпочтительного напряжения для использования в формировании выходного напряжения с заданными параметрами в данный момент времени. БВНН осуществляет выбор кода наименьшего отклонения и формирует импульсы коммутации для силового блока преобразователя.

На основе сигналов с выхода БВНН в любой момент времени СБ обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению  $u_1 \dots u_{12}$  питающей сети вне зависимости от вариации её параметров (амплитуды, частоты, формы кривой напряжения), формируя выходное напряжения  $u_{\text{вых}}$  наиболее близкое к эталонному сигналу. Данный способ использован при разработке бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты [7, 8] для питания переменного тока в автономных энергоустановках с переменной частотой вращения привода генератора с целью получения стабильной частоты.

Таким образом, использование способов на основе сравнения напряжения сети с эталонным сигналом позволяет разработать системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии, способные адаптироваться к изменению параметров напряжения источника электроэнергии.

### Выводы

На основе предложенных в данной работе способов построения адаптивных систем управления с использованием эталонных сигналов разработаны и исследованы на основе имитационного моделирования технические решения систем управления ПП [4-8], обладающие способностью адаптироваться к вариации частоты, амплитуды и формы напряжения источника электроэнергии.

Погрешность моментов подачи управляющих импульсов на СБ определяется соотношением частоты входного напряжения и генератора импульсов, порядком элементов, входящих в систему управления ПП, а также шагом квантования АЦП.

### Библиографический список

1. **Gnaciński, P.** et al. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 152193-152203, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133.
2. **Анисимов, Я.Ф.** Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок / Я.Ф. Анисимов, Е.П. Васильев. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
3. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Ленинград: Судостроение, 1973. – 227 с.
4. **Сугаков, В.Г.** Имитационная модель цифрового фазосмещающего устройства с повышенной разрешающей способностью по времени / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Электротехника, информационные технологии, системы управления». — 2019. — №31. С. 6 – 21.
5. Пат. 2658598 Рос. Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2017122675; заявл. 27.06.2017; опубл. 21.06.2018. Бюл. № 18.
6. Пат. 2612055, Рос. Федерация, МПК H02P9/14. Корректор напряжения/В. Г. Сугаков, Ю. С. Малышев, О. С. Хватов, Н. С. Варламов, И. И. Ягжов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2631862; заявл. 27.10.2016; опубл. 27.09.2017. Бюл. № 27.

7. **Сугаков В.Г.** Влияние изменения параметров источника электроэнергии на выходное напряжение бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления». — 2021. — №37. С. 48 – 68. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03
8. Пат. 2691968, Рос. Федерация, МПК H02M 5/27. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2018123270; Заявл. 26.06.2018; Опубл. 19.06.2019; Бюл. № 17



V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev

## APPLICATION OF A REFERENCE SIGNAL FOR BUILDING ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS FOR SEMICONDUCTOR ELECTRIC POWER CONVERTERS

Volga State University of Water Transport

**Abstract:** In the article considered ways of constructing technical solutions for control systems for semiconductor converters based on a reference signal. It is shown that the use of presented methods in the formation of output voltage provides adaptation to variation voltage parameters of electrical power source.

**Keywords:** reference signal, memory block, deviation of voltage parameters.

### References

1. Gnaciński, P. et al. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 152193-152203, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133.
2. Ya.F. Anisimov, E.P. Vasiliev, “Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship electrical installations]”, *Sudostroyeniye [Shipbuilding]*, pp.264, 1990, (in Russian)
3. Ya.F. Anisimov, “Osobennosti primeneniya poluprovodnikovyykh preobrazovateley v sudovykh elektroustanovka [Features of the use of semiconductor converters in ship electrical installations]”, Leningrad: Shipbuilding, pp. 227, 1973, (in Russian)
4. V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev, “Imitatsionnaya model' tsifrovogo fazosmeshchayushchego ustroystva s povyshennoy razreshayushchey sposobnost'yu po vremeni [Simulation model of a digital phase-shifting device with increased time resolution]”, *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems ”] no. 31, pp. 6-21, 2019

УДК 621.314

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_54

**Трунов Д.С., Вихорев Н.Н., Трофимов И.М.****ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ ОБРАТНОХОДОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ  
ДЛЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексева

**Аннотация:** в статье рассматривается схемотехническое решение в области полупроводниковых преобразователей электроэнергии, предназначенное для согласования параметров напряжений электрической сети и аккумуляторных систем накопления электроэнергии, способное обеспечивать двунаправленную передачу энергии. Перспективные области применения рассматриваемого зарядного устройства – системы аварийного и резервного электропитания, а также устройства выравнивания суточного графика нагрузки при применения возобновляемых источников энергии, такие как В2G (аккумулятор – сеть) и V2G (электромобиль – сеть). Приведены результаты имитационного моделирования работы полупроводникового преобразователя в режимах потребления и генерации электроэнергии.

**Ключевые слова:** двунаправленный преобразователь, накопители электрической энергии, battery-to-grid, vehicle-to-grid, энергоэффективность, smart grid, AC/DC преобразователи, обратногоходовый преобразователь.

Одними из перспективных направлений в области разработки систем накопления электроэнергии являются концепции Vehicle-to-Grid («V2G», «Автомобиль – электросеть») и Battery-to-grid («B2G», аккумулятор – сеть), подразумевающие интеграцию в локальную электрическую сеть здания устройства, содержащего аккумуляторную батарею (АБ).

Особый интерес представляет система V2G, позволяющая эксплуатировать АБ, входящую в состав электромобиля (ЭМ), как буферный накопитель энергии для решения задач резервного (непрерывного) электропитания объекта и сглаживания суточных графиков нагрузки. Актуальность данной темы обусловлена увеличением общего количества электромобилей и продолжительным временем их простоя в парковочной зоне, что позволяет представить парк ЭМ, как распределенный накопитель электроэнергии большой емкости. [1, 2, 3]

Выпускаемые на сегодняшний день модели ЭМ отличаются широким разбросом номинальных напряжений установленных АБ (200-900 В для городских ЭМ и 24-80 В для цеховых), что требует применения специализированных зарядных станций или разработки универсальных широкодиапазонных решений. Некоторые имеющиеся на сегодняшний день предложения в области V2G (рис. 1) также специализированы для конкретных марок и моделей ЭМ и несовместимы с другими производителями [4, 5].

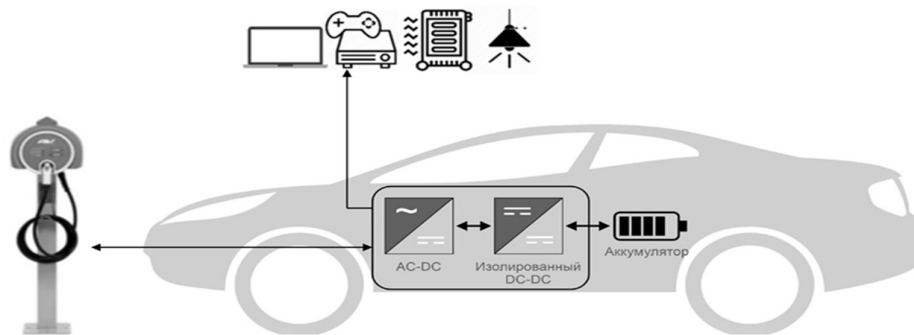


Рис. 1. Общая структура систем V2G

Возможным решением задачи согласования широкого диапазона номинальных напряжений АБ при сохранении возможности рекуперации электроэнергии в сеть может выступать двунаправленный преобразователь напряжения (ДП), принципиальная схема которого приведена на рис. 2. [6]

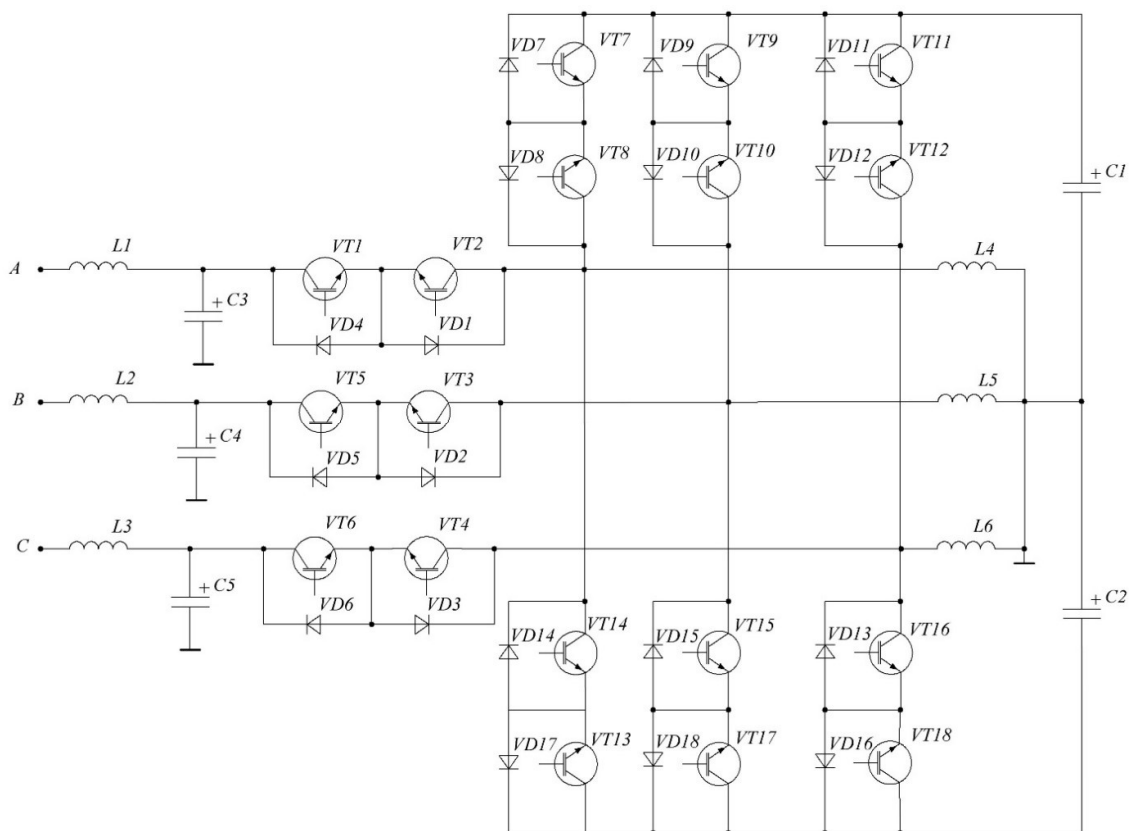


Рис. 2. Силовая часть двунаправленного преобразователя напряжения

В основу ДП заложена схемотехника обратного преобразователя напряжения, модифицированного с помощью двунаправленных транзисторных ключей для подключения к сети переменного напряжения. Посредством

изменения длительности открытого состояния ключей возможно обеспечить величину выпрямленного напряжения как выше, так и ниже амплитудного значения сетевого напряжения, что упрощает согласование с электрическими параметрами различных АБ. Двухнаправленные транзисторные ключи также позволяют обеспечить реверс энергии от АБ к электрической сети даже в том случае, если напряжение АБ ниже, чем сетевое.

Последовательность работы полупроводниковых элементов зависит от выбранного режима работы (потребление или генерация) и текущей полярности напряжения. Например, режиме заряда АБ в положительной полуволне сетевого напряжения ток протекает через транзистор  $VT1$  и диод  $VD1$  (параллельный  $VT2$ ), при этом дроссель  $L4$  запасает энергию. При включении транзистора  $VT13$  (и отключении  $VT1$ ), ток протекает через него и диод  $VD14$  (параллельно  $VT14$ ), при этом энергия, накопленная в  $L4$ , поступает в конденсатор  $C2$ . При отрицательной полуволне питающего напряжения накопление энергии в индуктивности обеспечивается включением транзистора  $VT2$  и диодом  $VD4$ , а поступление энергии в конденсатор  $C1$  обеспечивается включением  $VT8$  и  $VD7$ . В режиме генерации накопление энергии в дросселе производится от емкостного накопителя. При этом функционируют противоположные транзисторы, входящие в двухнаправленную пару ключей.

На рис. 3 приведены временные диаграммы сетевого напряжения и тока ( $U_s$ ,  $I_s$ ) в режиме заряда накопителя ( $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$ ).

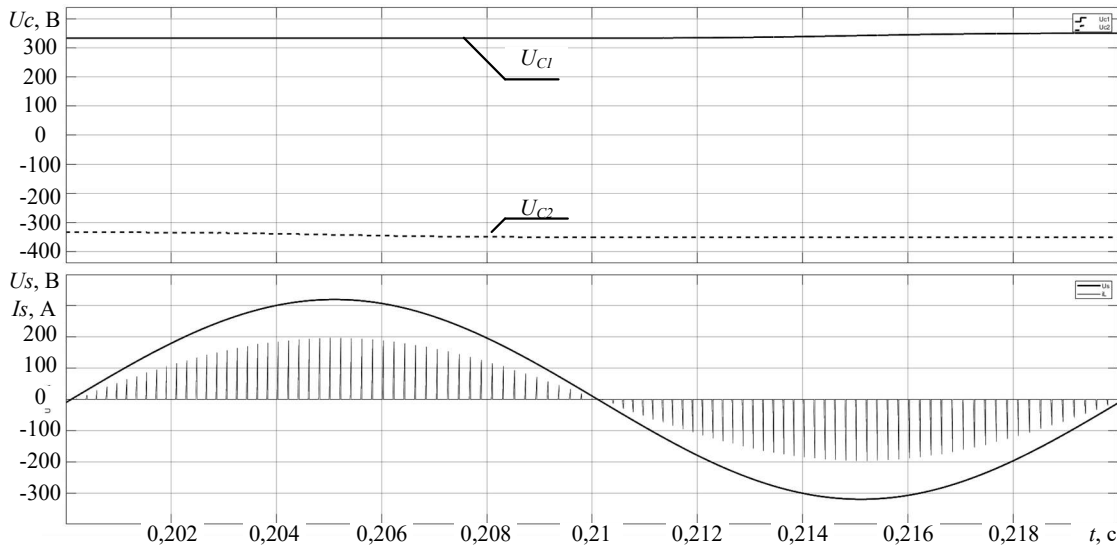
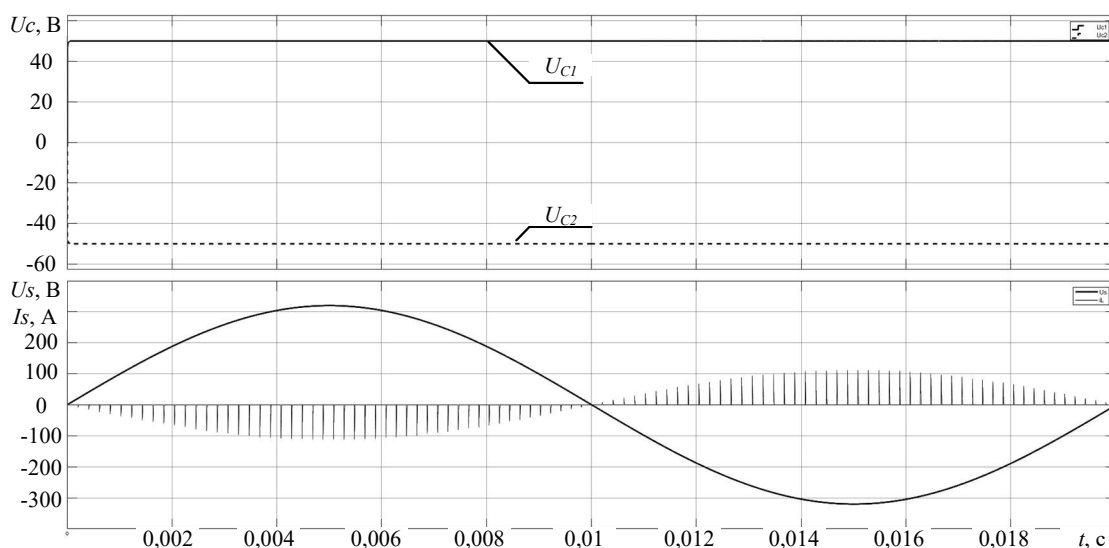


Рис. 3. Временные диаграммы токов и напряжений в режиме заряда накопителя

На приведенной временной диаграмме сетевой ток  $I_s$  носит импульсный характер, что обусловлено принципом работы обратного преобразователя. Однако при высокой частоте работы ключей и синусоидальной форме огибающей, соответствующей амплитуде импульсов, возможно обеспечить квазисинусоидальную форму тока, которая может быть дополнительно сглажена входным  $LC$  фильтром (рис. 2).

На рис. 4 приведены временные диаграммы сетевого напряжения и тока ( $U_s$ ,  $I_s$ ) в режиме генерации.



**Рис. 4. Временные диаграммы токов и напряжений в режиме генерации**

На приведенных временных диаграммах показана возможность формирования режима генерации при величинах напряжения АБ заведомо ниже амплитуды сетевого напряжения.

Предлагаемое решение представляет собой универсальный полупроводниковый прибор, предназначенный для согласования накопителей электроэнергии с широким диапазоном номинальных напряжений с параметрами электрической сети, что значительно упрощает эксплуатацию разнообразных ЭМ, оборудованных АБ. Дополнительная опция в виде возможности рекуперации энергии в сеть позволяет рассматривать ЭМ как элемент интеллектуальной электросети различного масштаба (Smart, Micro- или NanoGrid), обеспечивающий выполнение различных задач, связанных с буферным накоплением энергии в периоды, когда ЭМ не эксплуатируется по назначению, что открывает широкие перспективы к созданию больших распределенных накопителей электроэнергии.

#### Библиографический список

1. S. Esther, S. K. Singh, A. K. Goswami et al., "Recent challenges in vehicle to grid integrated renewable energy system: a review," in *Proceedings of the 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pp. 427–435, Madurai, India, 2018.
2. P. K. Joseph, E. Devaraj, and A. Gopal, "Overview of wireless charging and vehicle-to-grid integration of electric vehicles using renewable energy for sustainable transportation," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 627–638, 2019.
3. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019. – 210 с. - ISBN 978-5-91438-028

4. M. A. Masrur, A. G. Skowronska, J. Hancock et al., "Military-based vehicle-to-grid and vehicle-to-vehicle microgrid-system Architecture and implementation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 157–171, 2018.
5. B. Koushki, P. Jain, and A. Bakhshai, "Topology and controller of an isolated bi-directional AC-DC converter for electric vehicle," in *Proceedings of the 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1–8, Milwaukee, WI, USA, 2016.
6. M. R. T. Hossain, A. H. Abedin, and M. A. Choudhury, "A single phase SEPIC AC-DC Converter with improved power factor and input current THD," in *Proceedings of the 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 373–376, Dhaka, Bangladesh, 2016.

Trunov D. S., Vikhorev N. N., Trofimov I. M.

## BIDIRECTIONAL FLYBACK CONVERTER FOR ENERGY STORAGE SYSTEMS

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

**Abstract:** The article discusses a circuit design of semiconductor power converters, designed to match the voltage parameters of the electrical network and battery storage systems, capable of providing bi-directional energy transfer. Promising areas of application of the charger under consideration are emergency and backup power supply systems, as well as devices for equalizing the daily load schedule when using renewable energy sources, such as B2G (battery - grid) and V2G (electric vehicle - grid). The results of simulation modeling of the semiconductor converter operation in the modes of consumption and generation of electricity are presented.

**Keywords:** Bidirectional converter, electric energy storage, battery to grid, vehicle-to-grid, energy efficiency, Smart grid, AC/DC converters, fly-back converter.

### References

- [1] S. Esther, S. K. Singh, A. K. Goswami et al., "Recent challenges in vehicle to grid integrated renewable energy system: a review," in *Proceedings of the 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pp. 427–435, Madurai, India, 2018.
- [2] P. K. Joseph, E. Devaraj, and A. Gopal, "Overview of wireless charging and vehicle-to-grid integration of electric vehicles using renewable energy for sustainable transportation," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 627–638, 2019.
- [3] Forecast of energy development in the world and Russia 2019 / ed. by A. A. Makarov, T. A. Mitrova, V. A. Kulagin; INEI RAS-Moscow School of Management SKOLKOVO-Moscow, 2019. - 210 p. - ISBN 978-5-91438-028-8
- [4] M. A. Masrur, A. G. Skowronska, J. Hancock et al., "Military-based vehicle-to-grid and vehicle-to-vehicle microgrid-system Architecture and implementation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 157–171, 2018.
- [5] B. Koushki, P. Jain, and A. Bakhshai, "Topology and controller of an isolated bi-directional AC-DC converter for electric vehicle," in *Proceedings of the 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1–8, Milwaukee, WI, USA, 2016.
- [6] M. R. T. Hossain, A. H. Abedin, and M. A. Choudhury, "A single phase SEPIC AC-DC Converter with improved power factor and input current THD," in *Proceedings of the 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 373–376, Dhaka, Bangladesh, 2016.

---

---

## Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

---

---

УДК 621.3.07

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_60

**Т.Х. Абузяров, А.С. Плехов**

### АЛГОРИТМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДВОЙНОЙ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В данной работе представлен алгоритм формирования импульсов управления силовой частью двойной преобразовательной системы, работающей в составе шагового электропривода. Особенности данного преобразователя по сравнению с эквивалентной классической мостовой схемой являются: меньший уровень потерь, меньший размах пульсаций напряжения на обмотках электродвигателя, больший диапазон регулирования по скорости, меньшее напряжение источника питания. Предложенный алгоритм позволяет существенно уменьшить коэффициент гармонического искажения выходного напряжения преобразователя. Представлены результаты имитационного моделирования преобразователя в среде MATLAB / Simulink.

**Ключевые слова:** многоуровневый преобразователь, шаговый электродвигатель, моделирование электропривода, векторное управление, динамические потери.

#### Введение

Относительная простота организации систем управления, а также низкая стоимость изготовления способствовали широкому распространению шаговых двигателей (ШД) в системах подачи станков с числовым программным управлением малой мощности, системах позиционирования в робототехнике, аэрокосмической отрасли, бытовой технике и т. д. [1-2].

Одной из характерных особенностей ШД в сравнении с другими типами машин переменного тока выступает значительно большее число эквивалентных полюсов, что обуславливает необходимость генерации тока статора высокой частоты при достижении средних и высоких скоростях вращения вала. При этом импеданс фазы электродвигателя обусловлен главным образом реактивным сопротивлением. В связи с этим значительная часть энергии, генерируемой инвертором, является реактивной.

Ранние исследования [3-6] указывают на целесообразность применения в составе инверторной системы дополнительного преобразователя для компенсации реактивной энергии, потребляемой электродвигателем переменного тока и, в частности, ШД [3].

Данная работа является продолжением исследования [3] и посвящена разработке и анализу алгоритма генерации импульсов управления силовыми



ключами двойной инверторной системы в составе шагового электропривода, замкнутого по положению (посредством датчика или наблюдателя состояния).

### Структура электропривода

Силовая часть двойного преобразователя изображена на рисунке 1.

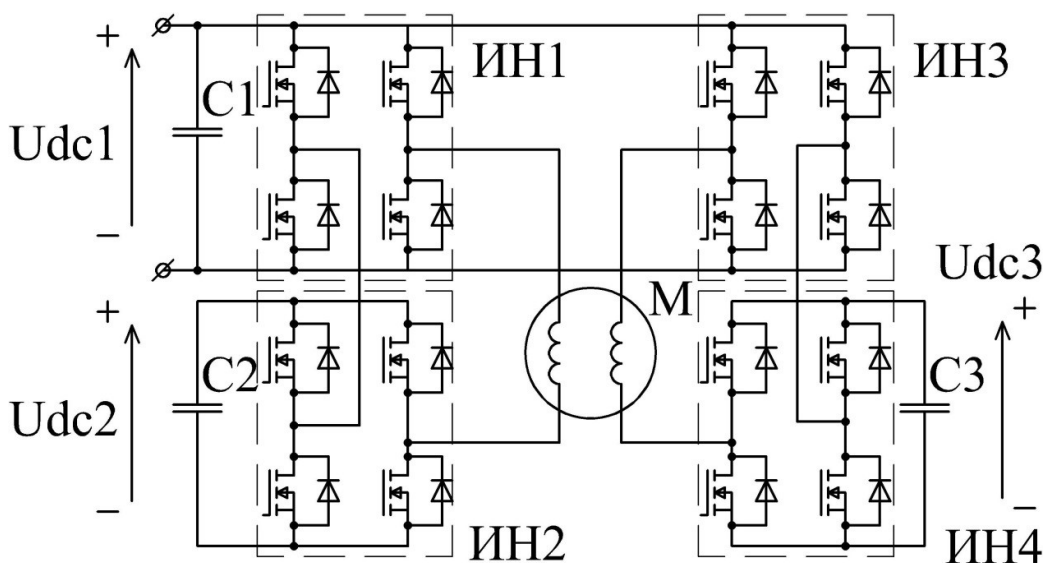


Рис. 1. Силовая часть исследуемой инверторной системы

Схема содержит четыре полномостовых инвертора ИН1–ИН4 – по два на каждую фазу электродвигателя. Звено постоянного тока основных инверторов ИН1 и ИН3 подключено к источнику питания, тогда как к звеньям постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 подключены только конденсаторы С2 и С3 соответственно. Инверторы ИН1 и ИН2 соединены последовательно с одной из обмоток ШД, их генерируемые напряжения складываются. Аналогично для инверторов ИН3 и ИН4.

Для управления данным преобразователем предложено использовать специальным образом модифицированное векторное управление электродвигателем. При таком подходе векторная диаграмма, построенная по уравнению статорной цепи, в зоне ослабления поля принимает вид, изображенный на рисунке 2.

Регулятор тока формирует вектор напряжения задания  $\vec{u}_{dq.ref}$  (в относительных единицах) в осях ротора  $dq$  таким образом, чтобы формировать заданный вектор тока статора  $\vec{i}$ , содержащий компоненты  $i_d$  (ослабления поля ротора  $\psi_m$ ) и  $i_q$  (создания электромагнитного момента). Поскольку инверторы ИН2 и ИН4 не обладают собственными источниками электроэнергии, необходимо

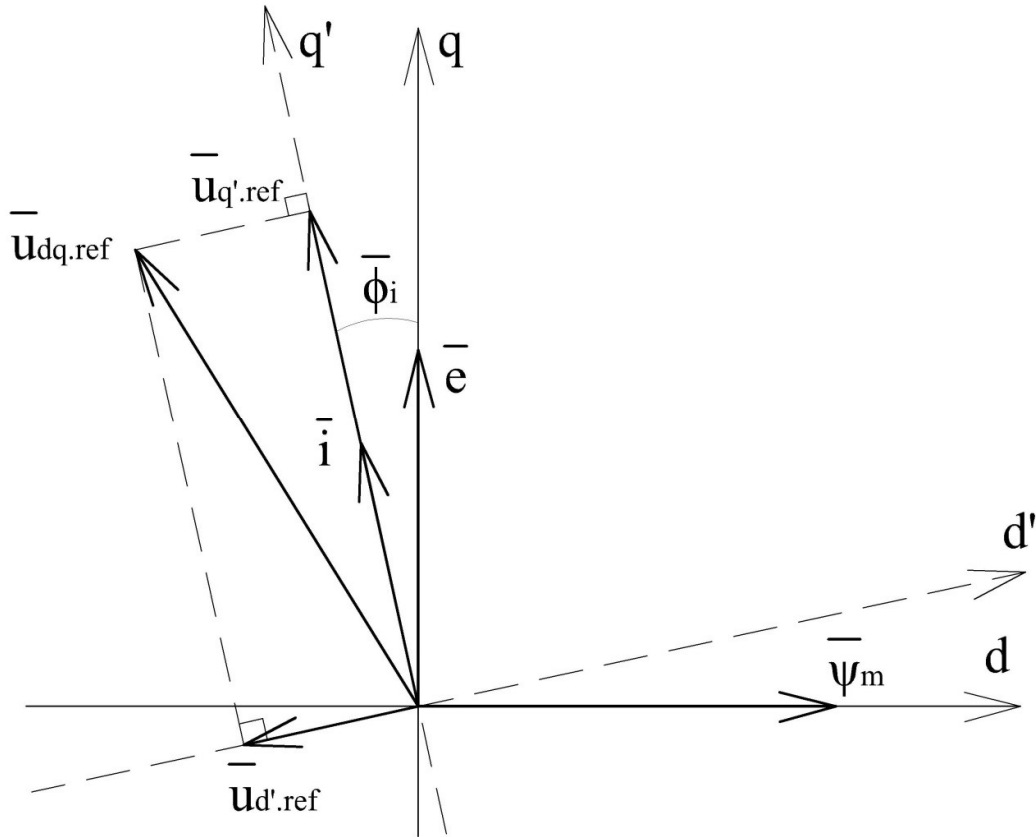


Рис. 2. Векторная диаграмма цепи статора ШД

управлять ими таким образом, чтобы они компенсировали потребляемую реактивную мощность электродвигателя и не генерировали при этом активную мощность. Для этого необходимо разбить вектор напряжения задания  $\bar{u}_{dq.ref}$  на проекции  $u_{d'.ref}$  и  $u_{q'.ref}$  по осям  $d'$  и  $q'$ , направленным по вектору тока статора  $\bar{i}$ , согласно уравнению

$$\begin{bmatrix} u_{d'.ref} \\ u_{q'.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & \sin(\varphi_i) \\ -\sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d.ref} \\ u_{q.ref} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $u_{d.ref}$ ,  $u_{q.ref}$  – проекции вектора напряжения задания  $\bar{u}_{dq.ref}$ , о. е., в осях ротора  $dq$ ;  $\varphi_i$  – угол поворота системы координат  $d'q'$  относительно системы координат  $dq$ , рад.

В случае, если модуль вектора  $\bar{u}_{d'.ref}$  не превышает единицы, векторы управления основной группой инверторов (ИН1 и ИН3)  $\bar{u}_{main.inv}$ , о. е., и дополнительной группой инверторов (ИН2 и ИН4)  $\bar{u}_{aux.inv}$ , о. е., определяются согласно выражению

$$\begin{cases} \bar{u}_{main.inv} = \bar{u}_{q'.ref}, \\ \bar{u}_{aux.inv} = \bar{u}_{d'.ref}. \end{cases} \quad (2)$$

При этом, как видно из рис. 2, инверторы ИН1 и ИН3 генерируют активную мощность (вектор их выходного напряжения сонаправлен вектору тока), а

инверторы ИН2 и ИН4 – только реактивную мощность (вектор выходного напряжения перпендикулярен вектору тока).

Для того, чтобы избежать появления высших гармоник тока вследствие работы вспомогательной инверторной группы в режиме овермодуляции, при превышении модулем вектора  $\bar{u}_{d'.ref}$  значения единицы, система управления перераспределяет вектор задания  $\bar{u}_{dq.ref}$  между двумя инверторными группами в соответствии с выражением

$$\begin{cases} \bar{u}_{main.inv} = \bar{u}_{q'.ref} + \bar{u}_{d'.ref} - \frac{\bar{u}_{d'.ref}}{|\bar{u}_{d'.ref}|}, \\ \bar{u}_{aux.inv} = \frac{\bar{u}_{d'.ref}}{|\bar{u}_{d'.ref}|}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, дополнительная группа инверторов, работая с глубиной модуляции, не превышающей единицы, по-прежнему генерирует только реактивную мощность, в то время как основная группа инверторов генерирует как активную, так и часть реактивной мощности, потребляемой электродвигателем.

Регулятор ослабления поля (РОП) системы управления при необходимости задает размагничивающий ток  $i_{d.ref}$  таким образом, чтобы поддерживать значение глубины модуляции основной группы инверторов ниже уровня единицы (при увеличении размагничивающего тока основной группе инверторов требуется меньшая глубина модуляции для поддержания заданного активного тока). При этом модуль тока задания ограничивается максимальным допустимым тепловым током на входе в регулятор тока (РТ). Более подробно механизмы формирования векторов управления инверторными группами, регуляции ослабления поля и входного напряжения дополнительных инверторов описаны в работе [3]. Далее описан механизм формирования импульсов управления транзисторными стойками исследуемого преобразователя.

### Алгоритм широтно-импульсной модуляции

На рис. 3 представлена построенная в среде *Matlab/Simulink* модель, отражающая процессы, происходящие в системе управления исследуемого шагового электропривода.

Подсистема «РШМ» в правой части рис. 3 отвечает за формирование сигнала управления транзисторами инверторной системы в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На вход этого блока поступают векторы управления дополнительной (входы «In1» и «In2») и основной (входы «In3» и «In4») группой инверторов, приведенные к неподвижным осям статора электрической машины (нечетные входы соответствуют проекциям векторов на ось  $\alpha$ , четные – на ось  $\beta$ ). Каждый выход содержит по четыре управляющих импульса для управления соответствующим полным мостом (сигналы «Out1» и «Out2» соответствуют вспомогательным инверторам ИН2 и ИН4, сигналы «Out3» и «Out4» –

основным инверторам ИН1 и ИН3). Основной задачей этого блока является формирование управляющих транзисторами сигналов таким образом, чтобы

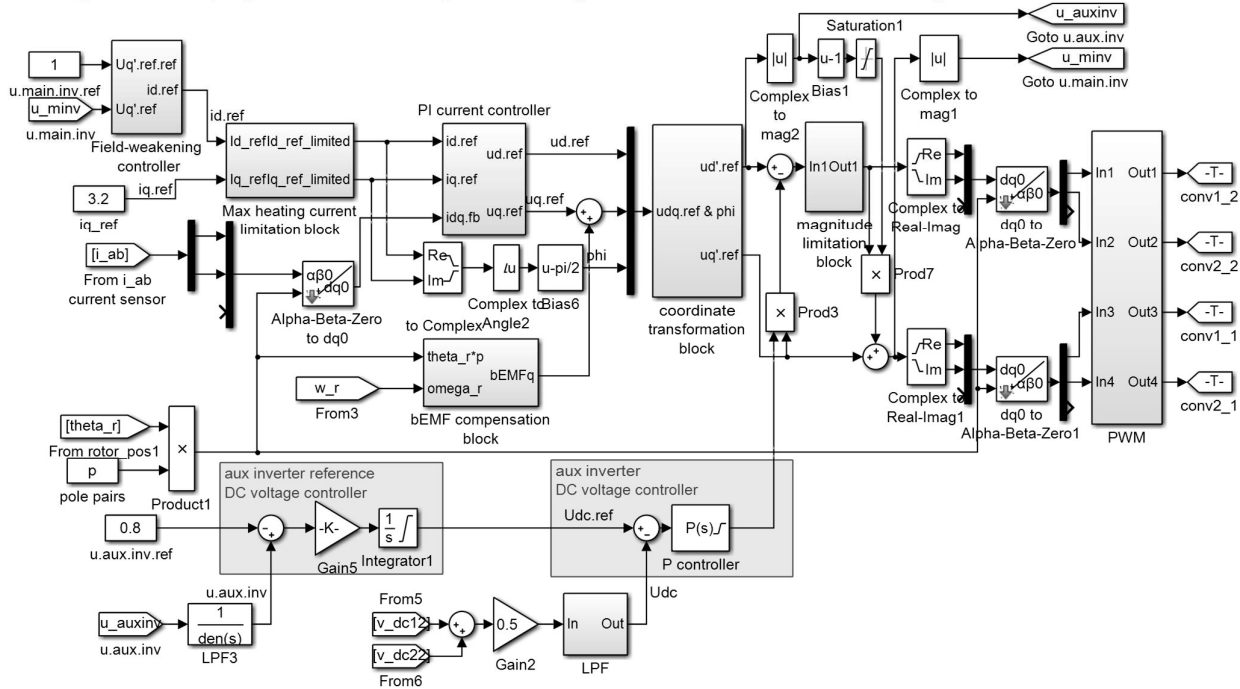


Рис. 3. Реализация системы управления имитационной модели электропривода с двойной инверторной системой в среде Matlab/Simulink

минимизировать размах пульсаций напряжения на обмотке электродвигателя за период несущей частоты. Для выполнения поставленной задачи используются четыре синхронизированных генератора ШИМ сигнала. При этом фазы опорного сигнала  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , рад, генераторов ШИМ вспомогательной группы инверторов изменяются согласно выражению

$$\varphi_j = \begin{cases} 0, & \text{sign}(In_i) \oplus \text{sign}(In_{i+2}) \\ \frac{\pi}{2}, & \text{sign}(In_i) \oplus \text{sign}(In_{i+2}) \end{cases} \quad (4)$$

где  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $j \in \{1, 2\}$  – номер канала ШИМ подсистемы «PWM»;  $In_i$  –  $i$ -й входной сигнал подсистемы «PWM».

Реализация подсистемы «PWM» в среде Matlab/Simulink представлена на рисунке 4. Опорный сигнал блоков двухуровневых ШИМ генераторов «PWM Generator j\_1» и «PWM Generator j\_2» отличаются по фазе на 90 градусов.

На рис. 5 отображены осциллограммы фазы опорного сигнала генератора ШИМ, выходные напряжения инверторов ИН1 и ИН2 фазы А, а также суммарное напряжение обмотки фазы А электродвигателя при работе электропривода на скорости 1000 об/мин и номинальной нагрузке. Благодаря смещению фазы опорного сигнала генератора ШИМ согласно выражению (4) размах пульсаций напряжения за период несущей частоты на обмотках ШД сократился с 96 В до 48 В, коэффициент гармонических искажений фазного напряжения снижен с

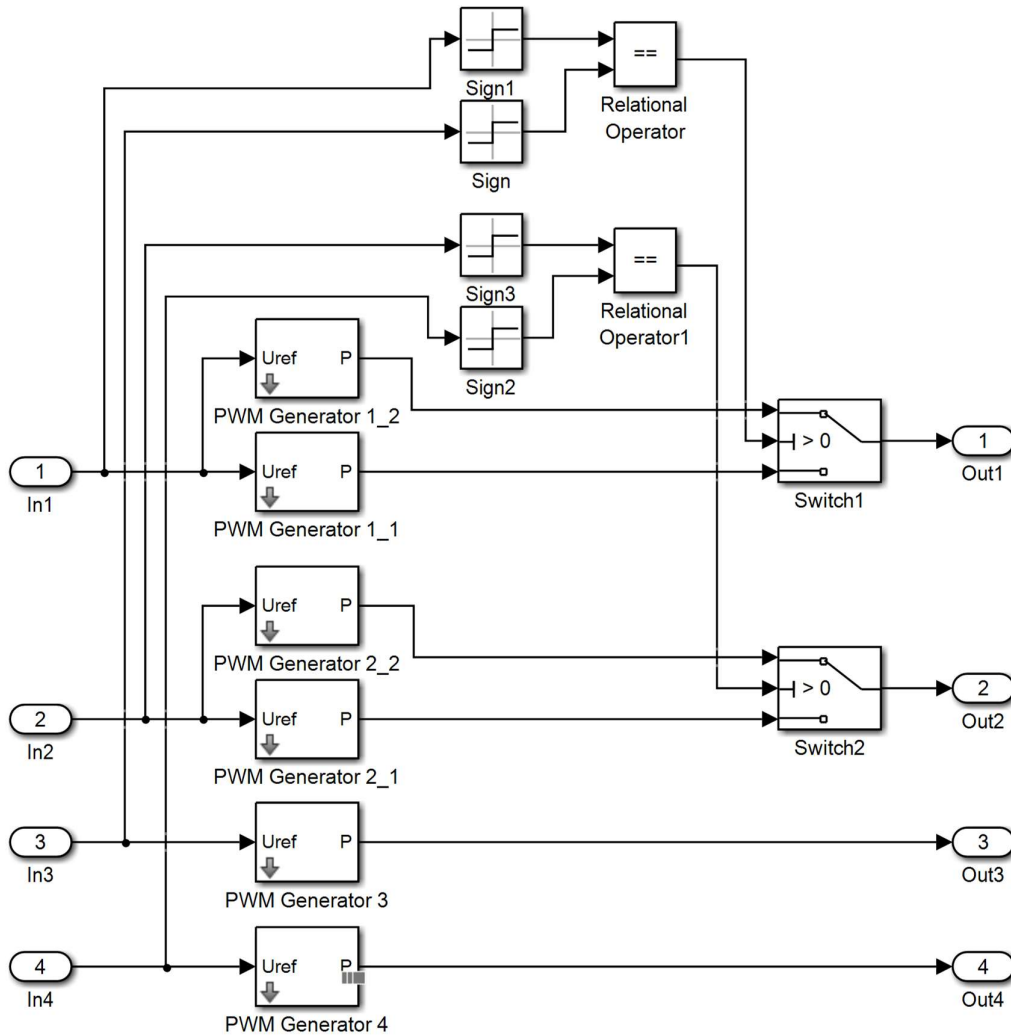


Рис. 4. Подсистема «PWM»

66,62 % до 39,49 %, а фазного тока – с 2,56 % до 1,09% при частоте ШИМ, равной 21,5 кГц

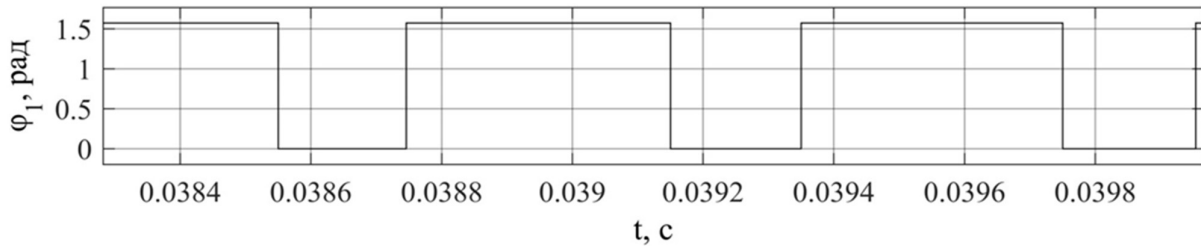
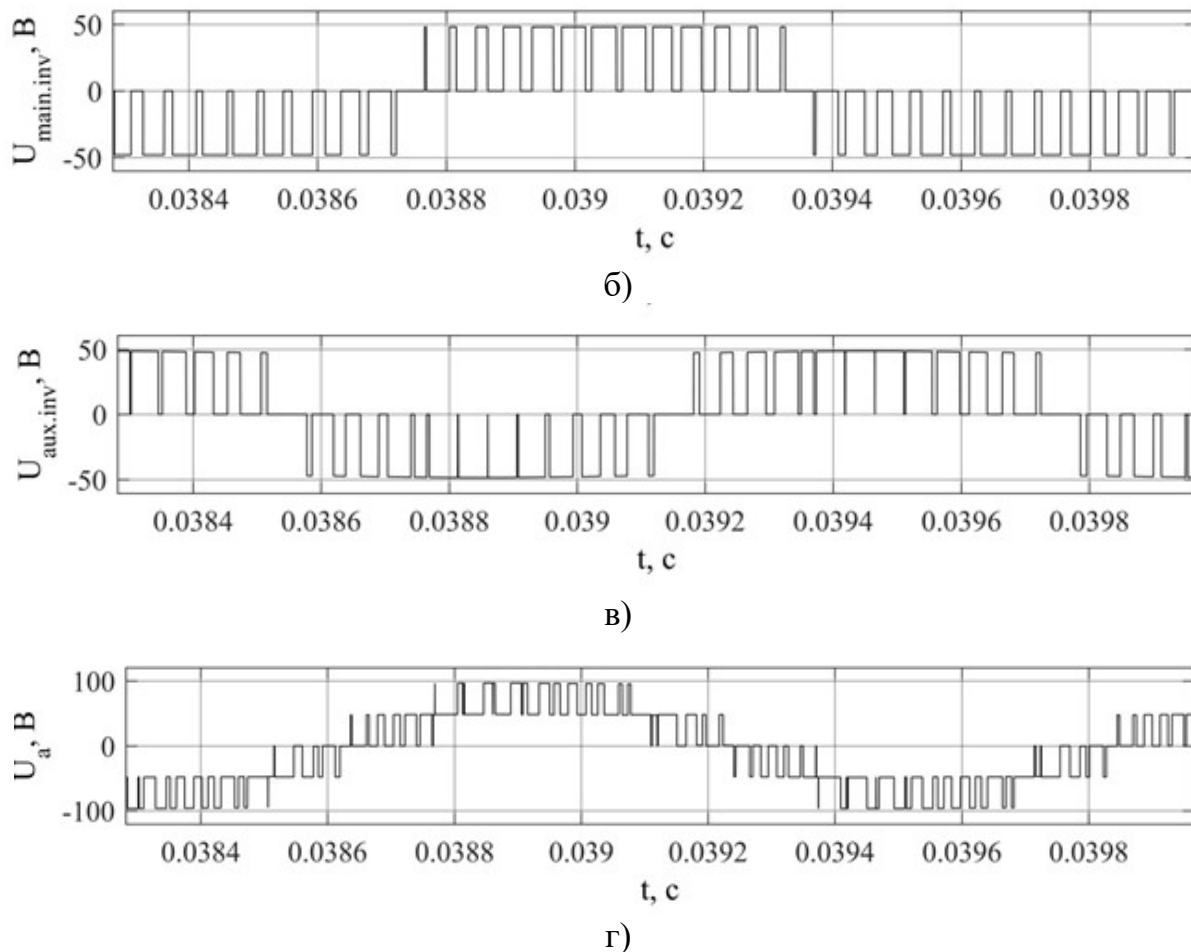


Рис. 5. Осциллограмма при работе ШД на скорости 1000 об/мин с номинальным моментом на валу:  
 а) фазы опорного сигнала генератора ШИМ  $\varphi_1$ , рад; (Начало)



**Рис. 5. Осциллограмма при работе ШД на скорости 1000 об/мин с номинальным моментом на валу: а) фазы опорного сигнала генератора ШИМ  $\varphi_1$ , рад; б) выходного напряжения инвертора ИН1, В; в) выходного напряжения инвертора ИН2, В; г) напряжения фазы А ШД (Окончание)**

### Заключение

В данной работе представлен алгоритм широтно-импульсной модуляции для двойной инверторной системы, работающей в составе шагового электропривода. Применение указанного алгоритма снижает размах пульсаций и, как следствие, коэффициент гармонических искажений выходного напряжения. Данное решение не требует включения в состав системы управления дополнительного оборудования.

Снижение коэффициента гармонических искажений выходного напряжения позволяет снизить частоту ШИМ при сохранении качества генерируемого электромагнитного момента, что уменьшит динамические потери в преобразователе

## Библиографический список

- 1 **Derammelaere S.** The Efficiency of Hybrid Stepping Motors / Derammelaere S. [et al.] // IEEE Industry Applications Magazine, pp. 50–60, July-August 2014, DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- 2 **Le K. M.** An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motor / Kien Minh Le, Hung Van Hoang, and Jae Wook Jeon // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. DOI 10.1109/TPEL.2016.26233413
- 3 **Абузяров, Т. Х.** Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 27-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34.
- 4 **Абузяров, Т. Х.** Каскадный преобразователь для электротранспорта с пространственно-векторным управлением / Т. Х. Абузяров, А. С. Плехов // Актуальные проблемы электроэнергетики : материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции, посвящается 100-летию плана ГОЭЛРО, Нижний Новгород, 17–18 декабря 2020 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020. – С. 41-47. – DOI 10.46960/39255930\_2020\_41.
- 5 **Абузяров, Т. Х.** Особенности имитационного моделирования сдвоенного преобразователя для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 3(11). – С. 100-109. – DOI 10.46960/2658-6754\_2020\_3\_100.
- 6 **Kim J.** Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors / Kim J. [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 2, april 2004

T.H. Abuzyarov, A.S. Plekhov

## PULSE-WIDTH MODULATION ALGORITHM FOR A DUAL INVERTER-FED STEPPER DRIVE

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

**Abstract:** The article represents a pulse width modulation algorithm for a stepper driver dual inverter control system. The advantages of the inverter over the classic full-bridge scheme include reduced losses, lower DC input voltage, and higher torque-speed curve. Presented modulation algorithm significantly reduces the total harmonic distortion (THD) of the inverter output voltage. Stepper driver dual inverter Matlab/Simulink models and simulation results are presented.

**Key words:** multilevel inverter, stepper drive, electric drive modeling, space vector control, dynamic losses.

### References

- [1] S. Derammelaere et al., "The Efficiency of Hybrid Stepping Motors: Analyzing the Impact of Control Algorithms," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 20, no. 4, pp. 50-60, July-Aug. 2014, doi: 10.1109/MIAS.2013.2288403.
- [2] Kien Minh Le, Hung Van Hoang, and Jae Wook Jeon. An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, DOI 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] T. Kh. Abuzyarov, "Dvoynaya invertotnaya sistema dlya pitaniya shagovogo elektrodvigatelya s umenshennym napryazheniyem zvena postoyannogo toka [Dual inverter system for powering the stepper motor with reduced DC link voltage]", "Electrotehnicheskiye sistemy i komplekсы," [Electrical systems and complexes], vol. 1(50), 2021, pp. 27-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34. (in Russian)
- [4] T. Kh. Abuzyarov, A. S. Plehov, "Kaskadnyi preobrazovatel dlya elektrotransporta s prostranstvenno-vektornym upravleniyem [Space vector control Dual-Inverter for an electric vehicle]", "Aktualnyye problemy electroenergetiki [Actual problems of the electric power industry]", 2020, p. 41-47. (in Russian)
- [5] T. Kh. Abuzyarov, "Ossobennosti imitatsionnogo modelirovaniya sdvoynnogo preobrazovatelya dlya elektrotransporta s prostranstvenno-vektornym upravleniyem [Space vector control Dual-Inverter modelling for an electric vehicle]", "Intellektualnaya electrotehnika [Intelligent electrical engineering]", 2020, no 3 (11), p. 100-109. (In Russian)
- [6] J. Kim, J. Jung and K. Nam, "Dual-inverter control strategy for high-speed operation of EV induction motors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 2, pp. 312-320, April 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825232.



А.В. Алейников, А.Н. Голубев

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ, УМЕНЬШАЮЩЕГО ВИБРАЦИИ МНОГОФАЗНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

**Аннотация:** В статье описан предложенный авторами подход к управлению многофазными синхронными двигателями с постоянными магнитами. Данный подход позволяет снизить вибрации, вызванные электромагнитными силами, возникающими между различными частями электрической машины.

**Ключевые слова:** многофазный синхронный электродвигатель, пульсации электромагнитного момента, вибрации электродвигателя, алгоритм управления.

С развитием техники к электроприводам постоянно выдвигаются все более жесткие требования, в том числе, и к их виброшумовым характеристикам. Возникновение вибраций происходит из-за переменных сил, действующих на различные элементы электрической машины и вызывающих их деформацию. Их можно разделить по характеру их возникновения на механические, аэродинамические и электромагнитные. Вибрации первой группы могут быть вызваны дисбалансом ротора, конструктивного исполнения и технологии изготовления подшипников, несоосного соединения двигателя с нагрузкой, низкой температурой масла (при принудительной циркуляции масла). Во вторую группу входят в основном вибрации, определяемые конструкцией вентиляторов и вентиляционных каналов. К третьей группе относятся вибрации, вызванные электромагнитными силами, возникающими между различными частями электрической машины. Условно они делятся на радиальные, тангенциальные и осевые. Пульсации электромагнитного момента приводят к неравномерности вращения двигателя, что может снижать качество обработки деталей и увеличивать нагрузку на элементы креплений и подшипниковые узлы. Радиальные силы, приложенные к зубцам, вызывают деформации статорного кольца и являются основной причиной возникновения магнитных шумов [1].

Использование многофазных систем позволит целенаправленно воздействовать на конфигурацию магнитного поля в воздушном зазоре [2, 3]. Это дает возможность посредством системы управления влиять на распределение в пространстве и во времени электромагнитных сил. Алгоритм управления, реализованный таким образом, чтобы снизить пульсации электромагнитных сил, позволит уменьшить вибрации и шумы, возникающие при работе двигателя. При построении такого алгоритма необходимо основываться на расчетах реального распределения магнитного поля в машине.

В работе [4] предложен подход к определению электромагнитного момента многофазного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ), основанный на предварительном расчете полевой модели и позволяющий в режиме реального времени рассчитывать момент с учетом реальной конструкции машины, дискретного распределения обмоток по пазам и насыщения магнитной цепи. Итоговое уравнение для расчета электромагнитного момента от фазных токов для двигателя без ферромагнитных вставок на роторе имеет вид:

$$M_{\Theta} = [i]^T \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}, \quad (1)$$

где  $M_{\Theta}$  – электромагнитный момент,  $[i]$  – матрица мгновенных значений фазных токов  $[\Psi_0]$  – матрица-столбец потокосцеплений фаз, обусловленных действием постоянных магнитов (ПМ) ротора.

Используя выражение (1), возможно определить мгновенное значение токов для обеспечения требуемого значения электромагнитного момента:

$$[i] = \frac{M_{\Theta}}{[S]^T \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}}, \quad (2)$$

где  $[S]$  – матрица столбец с размерностью, равной числу фаз, служащая для задания формы фазных токов. Ее значения заполняются по формуле

$$S_k = \frac{d\Psi_{0k}}{dt} \cdot \left| \frac{d\Psi_{0k}}{dt} \right| - \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{d\Psi_{0j}}{dt} \cdot \left| \frac{d\Psi_{0j}}{dt} \right|. \quad (3)$$

В работе [5] описан подход к определению в реальном времени радиальных электромагнитных сил, действующих на каждый зубец статора СДПМ. Электромагнитные силы предлагается определять через магнитный поток на основании предварительного расчета полевой модели

$$F_r(\alpha) = \frac{1}{2\mu_0 S_Z} \left( \left| \Phi_{ПМ+}(\alpha) + \lambda(\alpha) \cdot i_{3K} \frac{S_{Z+}(\alpha)}{S_Z} \right| + \left| \Phi_{ПМ-}(\alpha) - \lambda(\alpha) \cdot i_{3K} \frac{S_{Z-}(\alpha)}{S_Z} \right| \right)^2, \quad (4)$$

где  $\Phi_{ПМ+}$  – часть магнитного потока от южного полюса постоянного магнита,  $\Phi_{ПМ-}$  – часть магнитного потока от северного полюса постоянного магнита,  $S_Z$  – площадь наконечника зубца,  $S_{Z+}$  – площадь наконечника зубца, где протекает поток  $\Phi_{ПМ+}$ ,  $S_{Z-}$  – площадь наконечника зубца, где протекает поток  $\Phi_{ПМ-}$ ,  $i_{3K}$  – ток рассматриваемого зубцового контура [6],  $\lambda(\alpha)$  – магнитная проводимость зубцового контура.

На основании выражения (4) представляется возможным снизить пульсации радиальных сил, действующих на зубцы статорного кольца двигателя, меняя токи зубцового контура таким образом, чтобы радиальная сила, действующая на каждый зубец, была равна заданной. Однако проведенные исследования показали, что изменение тока зубцового контура зубца, через который происходит замыкание магнитного потока от разных полюсов магнита, практически не

изменяет радиальную силу до тех пор, пока магнитный поток полностью не перестанет замыкаться через данный зубец, что происходит при довольно больших значениях тока. Данный факт показывает, что невозможно полностью устранить пульсации радиальной силы только за счет формы токов. При этом на зубцы, через которые происходит замыкание магнитного потока, действует минимальная радиальная сила. Из этого следует вывод, что можно снизить пульсации радиальной силы, уменьшая силу, действующую на остальные зубцы. На данной логике был разработан алгоритм формирования токов статорной обмотки, снижающий вибрации статорного кольца посредством уменьшения разницы между максимальной и минимальной радиальными силами, действующими на зубцы статорного кольца при заданном ограничении по току.

Алгоритм должен формировать кривые фазных токов, выполняя следующие требования: поддержание заданного значения электромагнитного момента, обеспечение снижения максимального значения радиальных сил, действующих на зубцы, и удержание фазных токов в заданных ограничениях по амплитудному и действующему значениям. Данные условия можно записать в виде следующей системы соотношений:

$$\begin{cases} M_{\varnothing} = M_3, \\ I_m \leq I_{m3\Delta\Delta}, \\ I \leq I_{3\Delta\Delta}, \\ \max(F_r) \rightarrow \min. \end{cases}, \quad (5)$$

Один из вариантов алгоритма, обеспечивающего достижение поставленных условий с учетом заданных ограничений, представлен на рис.1. Алгоритм работает следующим образом: на основании текущего положения ротора по уравнениям (1–3) рассчитываются токи статорной обмотки, необходимые для создания заданного электромагнитного момента. После этого программа входит в цикл уменьшения пульсаций радиальных сил. В цикле программа находит зубец с максимальной радиальной силой при данных токах и положении ротора. Далее по уравнению (4) определяется градиент зависимости радиальной силы от контурных токов  $F_r(i_{k3})$ , согласно которому изменяется значение тока зубцового контура выбранного зубца. Следующим этапом является вычисление новых фазных токов и проверка ограничений по их максимальному и среднеквадратичному значениям.

Среднеквадратичное значение рассчитывается по формуле (6)

$$I = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m i_k^2}. \quad (6)$$

Если в функции присутствуют гармоники только с порядковым номером, меньшим числа фаз, то среднеквадратичное значение будет равно действующему значению.

Цикл повторяется до тех пор, пока среднеквадратичное и амплитудное значения фазных токов не превысят заданных параметров. После выхода из цикла

выбираются значения фазных токов из предыдущей итерации.



**Рис. 1. Алгоритм формирования формы фазных токов, обеспечивающих улучшение виброшумовых характеристик многофазного СДПМ.**

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты расчета математической модели для девятифазного СДПМ с заданием на уменьшение пульсаций электромагнитных сил при ограничении по действующему и амплитудному значениям тока в 130% от номинального. Для сравнения на рис. 3 представлены результаты расчета этого же двигателя с системой управления с питанием от синусоидального источника.

В табл. 1 приведены интегральные параметры для экспериментов, представленных на рис. 2 и рис. 3, а также максимальные изменения электромагнитного момента и радиальной силы.

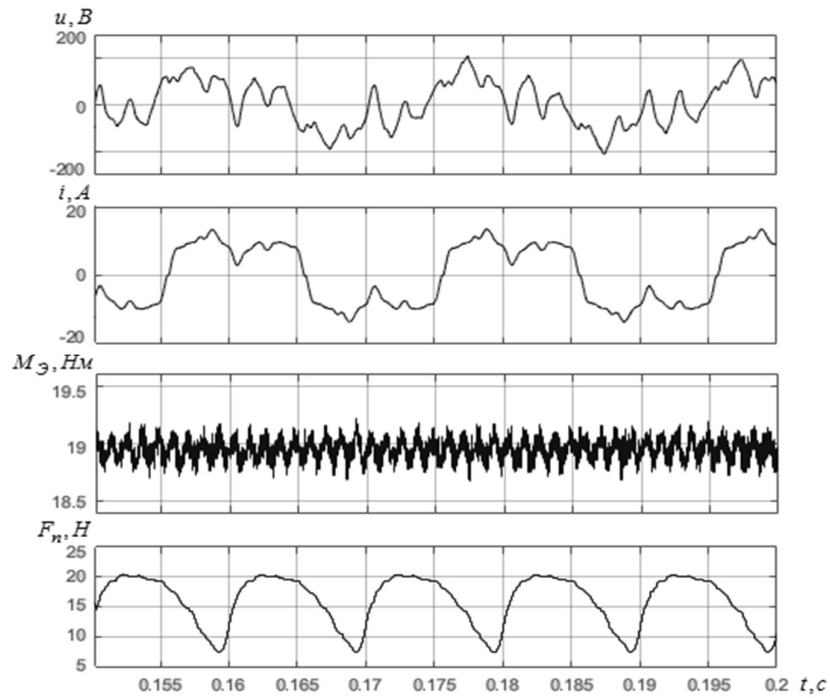


Рис. 2. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с системой управления, улучшающей виброшумовые характеристики

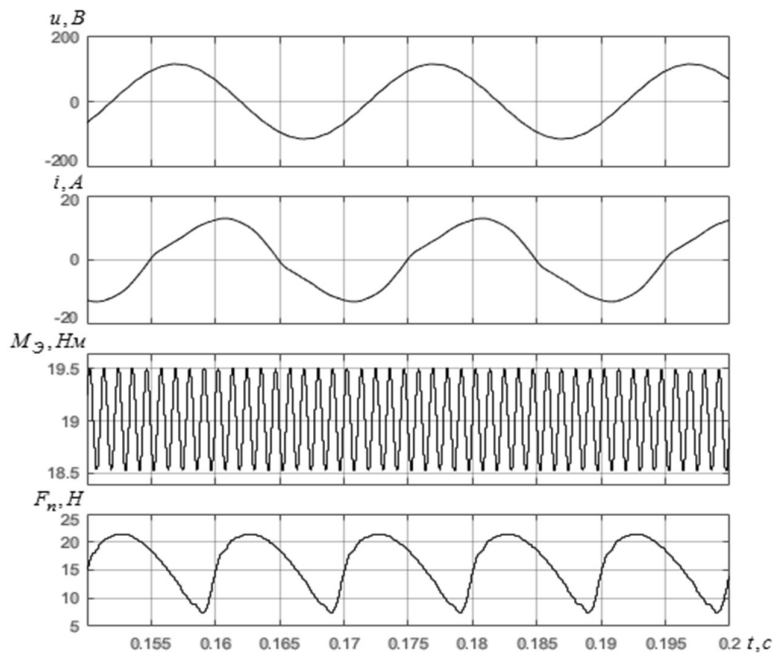


Рис. 3. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с питанием от синусоидального источника

Таблица 1

## Сравнение параметров СДПМ при использовании различных СУ

Вид СУ	U, В	I, А	Рэ, Вт	Рм, Вт	ΔМэ, Нм	ΔFn, Н
С синусоидальным источником	82	9	3300	2983	1	15
Улучшающая виброшумовые характеристики	91	8.8	3600		0.5	12.5

Результаты проведенного моделирования показали, что при питании двигателя от инвертора со стандартным выходным напряжением возможно посредством изменения алгоритма управления снизить пульсации электромагнитного момента и электромагнитных сил, действующих на зубцы статора. При этом потребляемая мощность вырастает незначительно.

## Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский, А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учебное пособие для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
2. **Голубев, А.Н.** Многофазный синхронный регулируемый электропривод / А.Н. Голубев, А.А. Лапин // ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина". – Иваново, 2008. – 156 с.
3. **Терешкин, В.М.** Перспективы применения многофазных машин переменного тока / В.М. Терешкин, Д.А. Гришин, И.А. Макулов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. – С. 19-26.
4. **Алейников, А.В.** Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 5. – С. 37-43.
5. **Алейников, А.В.** Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – №. 1 – С. 10-13.
6. **Мартынов, В.А.** Современные методы расчета нелинейных электромеханических устройств / ГОУВПО «ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2000. – 140 с.

A.V. Aleynikov, A.N. Golubev

## DEVELOPMENT ALGORITHM OF CONTROL THAT REDUCING VIBRATION OF MULTIPHASE SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russia

**Abstract:** The approach to the control of multiphase synchronous motors with permanent magnets is described in the article. This approach allows to reduce vibrations caused by electromagnetic forces that arise between the different parts of the electric machine.

**Key words:** multiphase synchronous electric motor, pulsations of the electromagnetic moment, vibration of electric motor, algorithm of control.

### References

- [1] A.V. Ivanov-Smolenskiy “Elektromagnitnye sily i preobrazovanie ehnergii v ehlektricheskikh mashinah [Electromagnetic forces and the trans-formation of energy in electric machines]”, Moscow, 312 p., 1989 (in Russian)
- [2] A.N. Golubev, A.A. Lapin “Mnogofaznyy sinhronnyy reguliruemyy elektroprivod [Multiphase synchronous regulated electric drive]”, Ivanovo, 156 p., 2008. (in Russian)
- [3] V.M. Tereshkin, D.A. Grishin, I.A. Makulov “Perspektivy primeneniya mnogofaznykh mashin peremennogo toka [Prospects of application of multiphase AC machines]”, *Elektronika i elektrooborudovanie transport [Transport electronics and electrical equipment]*, no.1, pp. 19-26, 2017. (in Russian)
- [4] A.V. Aleynikov, A.N. Golubev, V.A. Martynov “Razrabotka utochnennoj matematicheskoy modeli sinhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami dlya raschetov v real'nom vremeni [Development of a refined mathematical model of a synchronous motor with permanent magnets for real-time calculations]”, *Vestnik IGEU*, no. 5, pp. 37-43, 2017 (in Russian)
- [5] A.V. Aleynikov, A.N. Golubev, V.A. Martynov “Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami [Mathematical model for calculating electromagnetic forces in a synchronous electric drive with permanent magnets]”, *Vestnik IGEU*, no. 1, pp. 10-13, 2015 (in Russian)
- [6] V.A. Martynov, “Sovremennye metody rascheta nelineynykh elektromekhanicheskikh ustroystv [Modern methods for calculating nonlinear electro-mechanical devices]”, Ivanovo: ISPU, 140p., 2000 (in Russian)

И.Е. Бердников, А.Б. Дарьенков, С.Н. Горбунов, М.А. Сажин,  
А.П. Слuzов, В.В. Соколов

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРЯМОГО ПУСКА КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ СЕТИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассмотрено моделирование переходных процессов при пуске асинхронного электродвигателя от питающей сети ограниченной мощности. Приведено математическое описание асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и согласующего трансформатора. Построены зависимости пускового момента электродвигателя и снижения напряжения с питающей сети от мощности согласующего трансформатора, даны рекомендации по его выбору.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, прямой пуск электродвигателя, переходные процессы, математическое моделирование.

Асинхронный короткозамкнутый двигатель является самым распространенным исполнительным двигателем электрооборудования промышленных предприятий. Несмотря на широкое внедрение преобразователей частоты для построения регулируемого электропривода, пока в основной массе асинхронный электропривод – нерегулируемый с прямым подключением к сети.

Анализ процесса прямого пуска асинхронного двигателя при питании от идеальной сети проводят с использованием модели двигателя в системе координат, вращающейся со скоростью питающей сети [1]. В статье рассматривается построение модели асинхронного двигателя с учетом параметров реальной питающей сети.

На рис. 1 приведена структурная схема модели асинхронного двигателя при питании от идеальной сети. Схема построена на основании основных уравнений асинхронного электропривода и уравнений Парка-Горева:

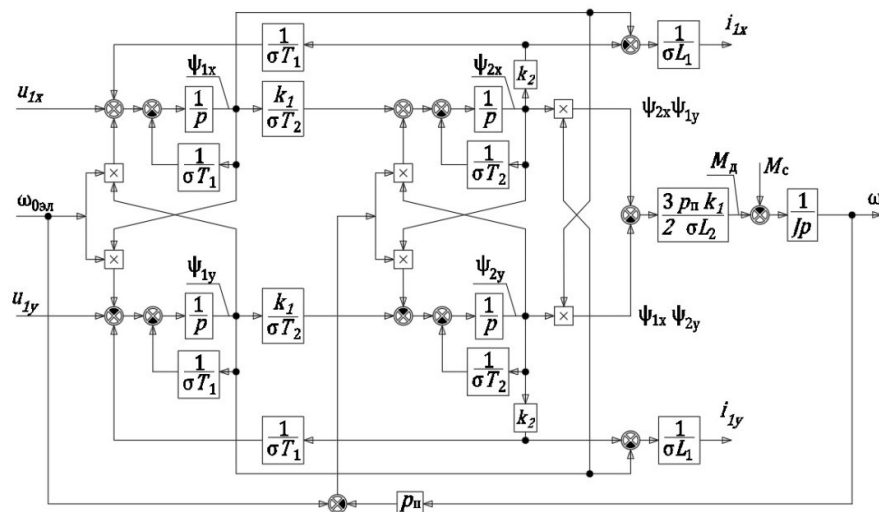


Рис. 1. Структурная схема модели асинхронного двигателя при питании от идеальной сети



$$\left\{ \begin{array}{l}
 p\Psi_{1x} = u_{1x} - \frac{1}{\sigma T_1} \Psi_{1x} + \omega_{0эл} \Psi_{1y} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \Psi_{2x} \\
 p\Psi_{1y} = u_{1y} - \frac{1}{\sigma T_1} \Psi_{1y} - \omega_{0эл} \Psi_{1x} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \Psi_{2y} \\
 p\Psi_{2x} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \Psi_{1x} - \frac{1}{\sigma T_2} \Psi_{2x} + (\omega_{0эл} - p_n \omega) \Psi_{2y} \\
 p\Psi_{2y} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \Psi_{1y} - \frac{1}{\sigma T_2} \Psi_{2y} - (\omega_{0эл} - p_n \omega) \Psi_{2x} \\
 i_{1x} = \frac{1}{\sigma L_1} (\Psi_{1x} - k_2 \Psi_{2x}) \\
 i_{1y} = \frac{1}{\sigma L_1} (\Psi_{1y} - k_2 \Psi_{2y}) \\
 i_{2x} = \frac{1}{\sigma L_2} (\Psi_{2x} - k_1 \Psi_{1x}) \\
 i_{2y} = \frac{1}{\sigma L_2} (\Psi_{2y} - k_1 \Psi_{1y}) \\
 M_\partial = \frac{3}{2} p_n \frac{k_1}{\sigma L_2} (\Psi_{2x} \Psi_{1y} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}) \\
 p\omega = \frac{1}{Jp} (M_\partial - M_c),
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$  – постоянная времени обмотки статора, с;  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$  – постоянная времени обмотки ротора, с;  $k_1 = \frac{L_m}{L_1}$  – коэффициент основного магнитного потока обмотки статора;  $k_2 = \frac{L_m}{L_2}$  – коэффициент основного магнитного потока обмотки ротора;  $\sigma = 1 - k_1 \cdot k_2$  – коэффициент рассеяния машины.

Результаты моделирования прямого пуска с использованием данной модели асинхронного двигателя мощностью в 90 кВт, параметры которого приведены в табл. 1 [2], показали, что симуляция работы данной модели совпадает с симуляцией работы готового блока асинхронного двигателя, предложенного в «*Simulink*» - «*Asynchronous Machine*» [3,4], таким образом подтверждается её работоспособность.

Параметры асинхронного двигателя 4А250М4У3

Номинальная мощность двигателя, кВт	90
Синхронная скорость вращения, об/мин	1500
Номинальное фазное напряжение питающей сети, В	220
Коэффициент полезного действия, %	93
Коэффициент мощности %	91
Номинальное скольжение %	1,3
Критическое скольжение %	23,7
Коэффициент механической перегрузки	2,3
Кратность пускового момента	1,2
Кратность пускового тока	7
Реактивное сопротивление намагничивающего контура, Ом	4,47
Активное сопротивление фазы статора, Ом	0,1137
Реактивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом	0,073
Приведённое активное сопротивление фазы ротора, Ом	0,044
Приведённое реактивное сопротивление рассеяния фазы ротора, Ом	0,073
Номинальный ток статора, А	161
Номинальный момент двигателя, Н·м	580

Параметры питающей сети во вращающейся с синхронной скоростью системе координат  $(x; y)$  можно учесть на основании системы уравнений

$$\begin{cases} U'_x = U_x - I_x R_c + X_c I_y = U_m - (I_x R_c - X_c I_y) \\ U'_y = -I_y R_c - X_c I_x = -(I_y R_c + X_c I_x), \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_x, U_y$  – составляющие напряжения идеальной сети по осям  $x$  и  $y$ ;  $U'_x, U'_y$  – составляющие напряжения реальной сети по осям  $x$  и  $y$ ;  $R_c$  – активное сопротивление сети, Ом;  $X_c = \omega_{0эл} L_c$  – реактивное сопротивление сети, Ом.

Данной системе уравнений соответствует векторная диаграмма, изображённая на рис. 2.

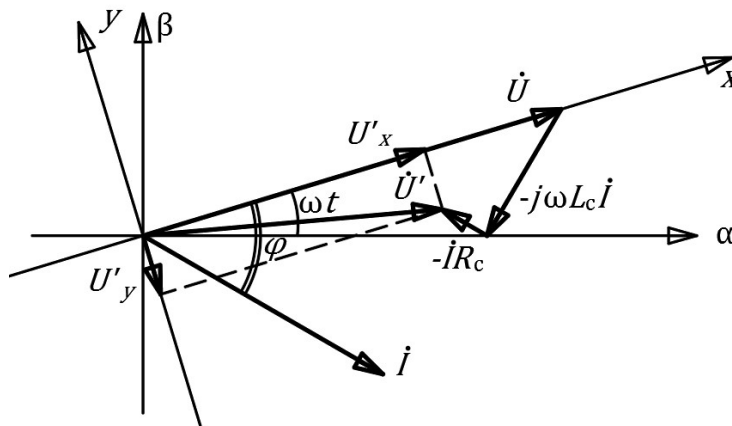


Рис. 2. Векторная диаграмма, описывающая переход от идеальной питающей сети к реальной

Совместимый с приведенной ранее структурной схемой, инструмент исследования прямого пуска асинхронного двигателя с учетом параметров питающей сети представлен на рис. 3.

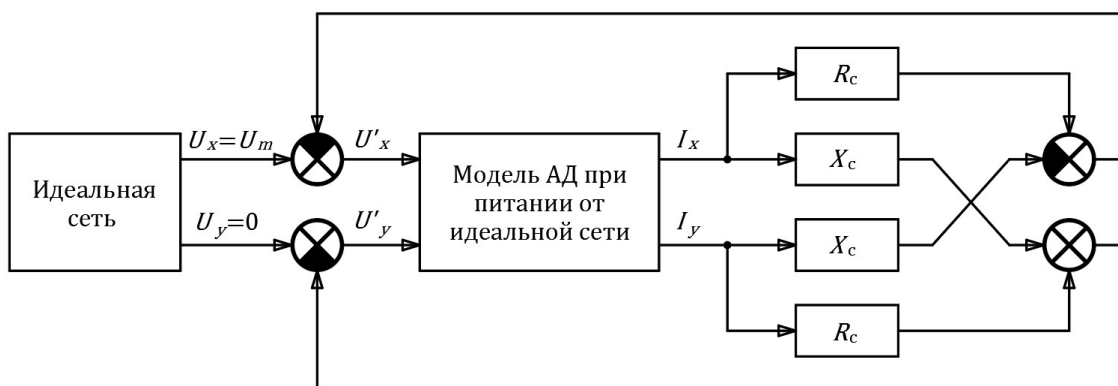


Рис. 3. Структурная схема модели асинхронного двигателя при питании от реальной питающей сети

Разработанная модель асинхронного двигателя, учитывающая параметры питающей сети, позволила определить величину пускового момента ( $M_{п}$ , Н · м) и значения отклонений напряжения (в процентах от номинального,  $\Delta U$ , %) при прямом пуске асинхронного двигателя 4А250М4У3, при разной мощности питающего трансформатора ( $S_{ТВ}$ , кВА). Результаты моделирования приведены на рис.4.

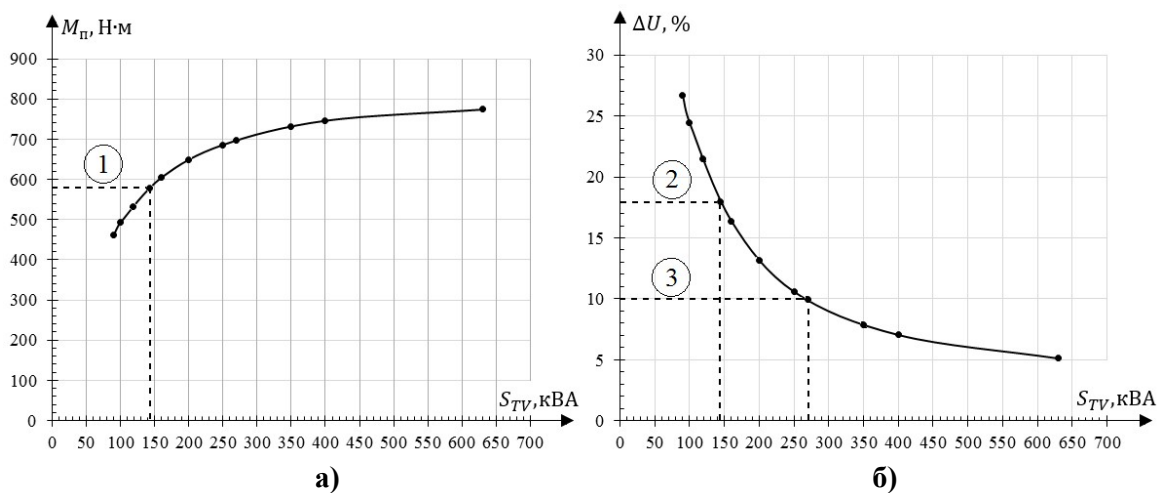


Рис. 4. Результаты моделирования прямого пуска асинхронного двигателя от сети ограниченной мощности: а) график зависимости  $M_{п} = f(S_{ТВ})$   
 б) график зависимости  $\Delta U = f(S_{ТВ})$

Параметры трансформаторов для модели были определены в результате кусочно-квадратичной интерполяции известных параметров масляных трансформаторов серии ТМ [5].

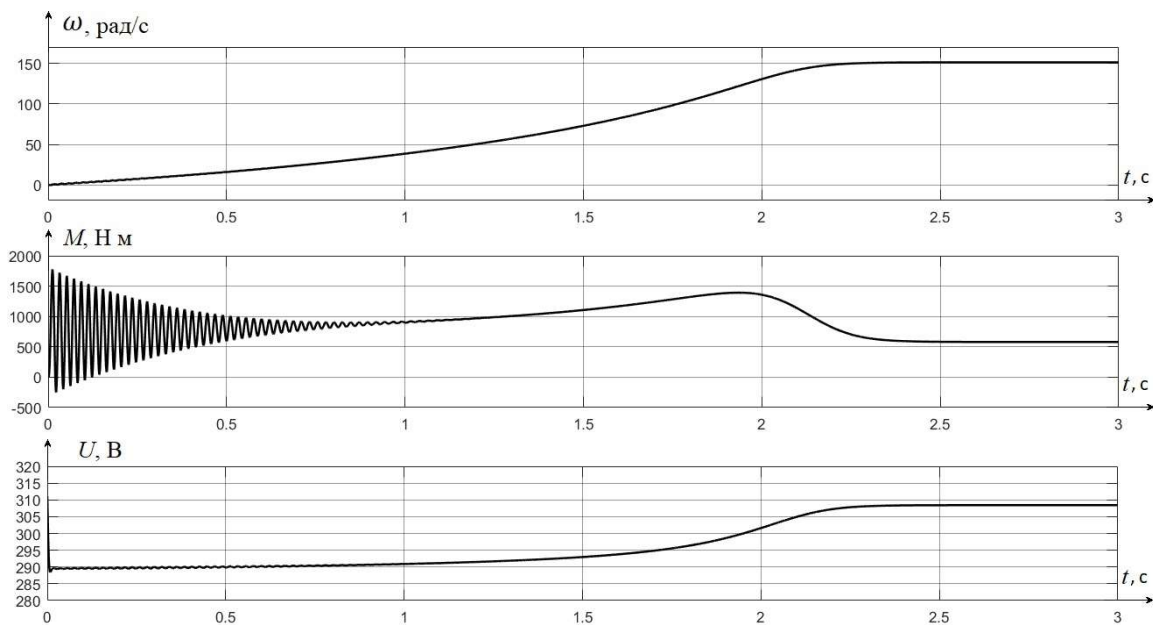
На графиках проведены вспомогательные линии, наглядно иллюстрирующие результаты анализа. Пересечение линии 1 с графиком (4, а) показывает, что

при мощности сети 144 кВА (на 60% превышает мощность двигателя) будет возможен пуск двигателя с номинальным статическим моментом. Вспомогательная линия 2 на графике (4, б) показывает, что при данной мощности сети посадка напряжения составляет 18% от номинального напряжения.

Согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.» [6] кратковременное отклонение напряжения сети не должно превышать 10% от номинального напряжения. Для соблюдения данного условия мощность сети должна составлять не менее 270 кВА (должна в три раза превышать мощность двигателя), что демонстрирует вспомогательная линия 3 на графике (4, б).

Осциллограммы скорости, момента и напряжения фазы статора двигателя 4A250M4У3 при питании от ближайшего трансформатора большей мощности (ТМ-400/10/0,4) представлены на рис. 5.

Данные осциллограммы представляют одну точку на графиках, изображённых на рис. 4. Таким образом, для двигателя 4A250M4У3, мощностью в 90 кВт, был выбран трансформатор ТМ-400/10/0,4, мощностью 400 кВА, который обеспечивает пуск с номинальным моментом  $M_H = 580 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и отклонением напряжения  $\Delta U = 7\%$ .



**Рис. 5. Осциллограммы скорости, момента и амплитудного значения напряжения фазы статора двигателя при прямом пуске от реальной питающей сети**

Разработана структурная схема и математическая модель, учитывающая реальные параметры питающей сети и позволяющая адекватно моделировать процесс прямого пуска асинхронного двигателя.

Определено соотношение мощности питающей сети и двигателя, при котором возможен прямой пуск асинхронного двигателя с номинальным

моментом на валу. Мощность питающей сети должна в (1,5-2) раза превышать мощность двигателя.

Определено соотношение мощности питающей сети и двигателя, при котором посадка напряжения в питающей сети не превышает допустимых ГОС-Том 10%. Мощность питающей сети должна в (2,5-3) раза превышать мощность двигателя.

Разработанная математическая модель для анализа прямого пуска асинхронного двигателя при питании от реальной электрической сети была использована при экспертной оценке возможности прямого пуска группы двигателей при автоматическом вводе резерва проектируемого нефтехимического производства и подтвердила правильность проведенных аналитических расчетов и принятых проектных решений.

### Библиографический список

1. **Соколовский, Г. Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / Г. Г. Соколовский. - Москва: Академия, 2007, 265 с., ил.
2. **Кравчик, А.Э.** Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М.: Энергоиздат, 1982
3. **Мусалимов, В.М.** Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений/ Мусалимов В.М., Г.Б. Заморуев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А.Нуждин. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 114с.
4. **Герман-Галкин, С.Г.** MatLab &Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. /Герман-Галкин С.Г. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
5. Каталог трансформаторов серии ТМ[Электронный ресурс]. URL: <http://uralenergy.ru/catalog/r-7.html> (дата обращения: 10.05.2021).
6. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

I. E. Berdnikov, A. B. Darienkov, S. N. Gorbunov, M. A. Sazhin, A. P. Sluzov, V. V. Sokolov

## ESTIMATION OF THE POSSIBILITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS DIRECT START FROM A LIMITED CAPACITY POWER GRID

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

**Abstract:** The article deals with the modeling of transient processes during the start of an asynchronous motor from a limited power supply network. A mathematical description of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor and a grid transformer is given. The dependences of the electric motor starting torque and the supply network voltage drop versus the power of the grid transformer are described and recommendations for grid transformer selection are given.

**Keywords:** asynchronous electric drive, direct start of an electric motor, transient processes, mathematical modeling.

### References

- [1] Sokolovskiy, G. G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem: uchebnik dlya vuzov / G. G. Sokolovskiy. - Moskva: Akademiya, 2007, 265 s., il.
- [2] Kravchik, A.E. Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik/ A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, Ye. A. Sobolevskaya. – M.: Energoizdat, 1982
- [3] Musalimov, V.M. Modelirovaniye mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink / SimMechanics): uchebnoye posobiye dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy/ Musalimov V.M., G.B. Zamoruyev, I.I.Kalapyshina, A.D. Perechesova, K.A.Nuzhdin. – SPb: NIU ITMO, 2013. – 114s.
- [4] German-Galkin, S.G. MatLab & Simulink. Proyektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK. /German-Galkin S.G. – SPb.: KORONA-Vek, 2008. – 368 s.
- [5] Katalog transformatorov serii TM[Elektronnyy resurs]. URL: <http://uralenergy.ru/catalog/r-7.html> (Accessed: 10.05.2021).
- [6] GOST 32144-2013 «Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya».

Б.А. Гордеев<sup>1</sup>, С.Н. Охулков<sup>1</sup>, А.И. Ермолаев<sup>1</sup>,  
А.А. Макарьев<sup>2</sup>, А.Н. Осмекин<sup>3</sup>

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ №8 НА БУМКОМБИНАТЕ «ВОЛГА» (Г. БАЛАХНА)

Институт Проблем Машиностроения Российской Академии Наук,  
Филиал ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН»<sup>1</sup>  
ООО «КОПОС – НН»<sup>2</sup>  
АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения  
имени И.И. Африкантова»<sup>3</sup>

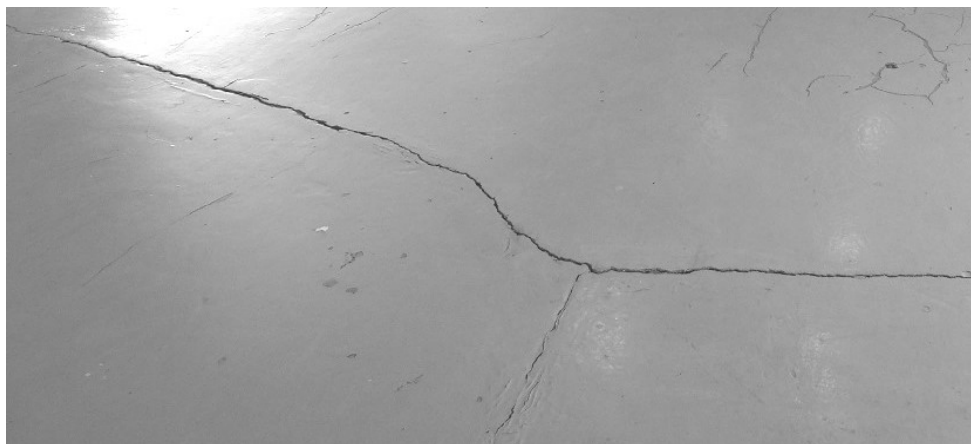
**Аннотация:** В статье изложен ход вибрационного диагностирования крупной бумагоделательной машины. Измерения проводились с помощью измерительного прибора «Вибран 2.2» в разных точках машины и цеха. На этапе изучения спектрограмм вибраций было установлено, что над вибрацией существенно преобладают ударные нагрузки, а основная гармоника вибраций характеризуется частотой 7-8 Гц, что соответствует частоте вращения средних валов машины. Теоретическими методами установлена причина возникновения прогрессирующей вибрации, создаваемой вращением массивных валов стана «Voith», заключающаяся, с одной стороны, в износе подшипников, сопровождающемся деформацией колец и взаимным смещением их осей вращения, и, с другой стороны, в увеличении радиусов эксцентриситета валов, вызывающем рост динамических нагрузок, действующих на подшипниковые узлы. Авторы статьи, непосредственно занимающиеся вибродиагностикой стана, пришли к выводу, что для снижения уровня его вибрации достаточно заменить подшипники на новые, поскольку имеющиеся по причине продолжительной эксплуатации (более 25 лет) и воздействию вибрационных и ударных нагрузок давно отработали свой ресурс.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, вибрации, ударные нагрузки, эксцентриситет вала, электрическая машина, асинхронный двигатель, износ подшипников, бумагоделательная машина.

### Введение

В настоящее время в одном из цехов на бумкомбинате «Волга» в городе Балахна по перекрытиям здания пошли трещины (рис. 1). Юыла установлена основная причина растрескивания здания, заключающаяся в интенсивных грунтовых процессах, ведутся активные работы по укреплению грунта. Результаты исследования проблемы с позиции геодезии и строительной механики будут опубликованы в отдельной научной работе.

Также фактором, усугубляющим процесс разрушения здания, является вибрационная активность бумагоделательной машины №8 производства австрийской компании «Voith». Этот вывод подтверждает тот факт, что трещина, образовавшаяся под станом, имеет наибольшую ширину, примерно в два раза превышающую ширину остальных трещин, образовавшихся на бетонном полу производственного участка (рис. 2).

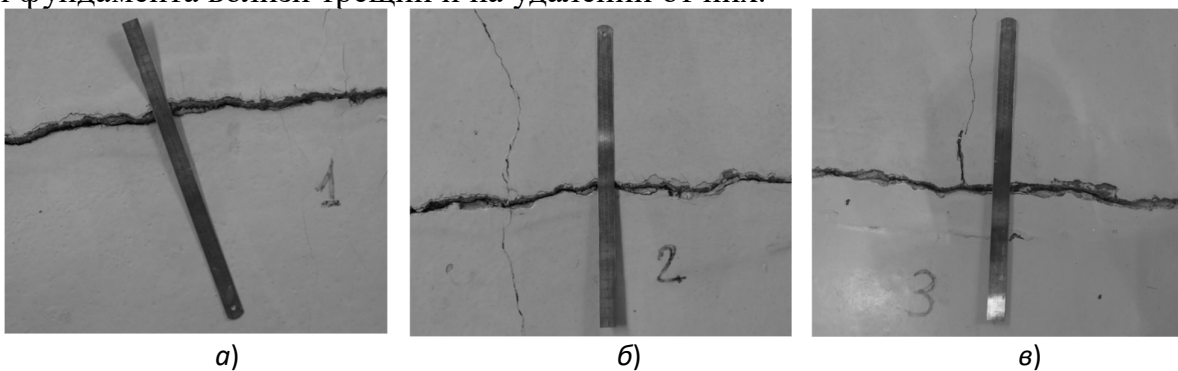


**Рис. 1. Внешний вид трещины на бетонном полу производственного участка бумагоделательной машины № 8, образовавшийся в результате вибрационного воздействия и осадки грунта**

В данной статье авторы попытаются теоретически обоснованно установить причину повышенной виброактивности машины с целью её дальнейшего устранения и увеличения срока службы здания. Кроме того, опыт эксплуатации бумагоделательной машины №8 и всего цеха в целом в будущем поможет заблаговременно предотвращать возникновение предаварийных ситуаций на других предприятиях, оснащенных массивными производственными комплексами.

#### **Проведение вибрационных испытаний**

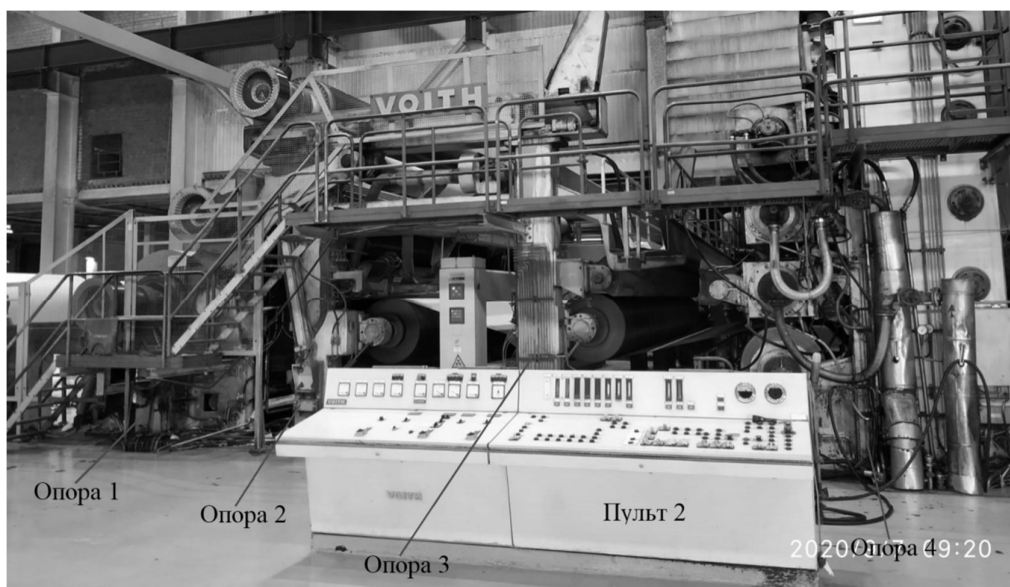
Для проведения вибрационных испытаний на бумагоделательной машине и в здании были выбраны следующие точки: четыре на каждой из опор с лицевой стороны стана, две – на пультах управления (одна – возле стана в 10 метрах от трещины, вторая - напротив стана в непосредственной близости к трещине), четыре – на полу напротив опор стана, две – на полу у колонн (одна – напротив стана в непосредственной близости к трещине, вторая – вдали от трещины) и одна – непосредственно на колонне (напротив стана вблизи трещины). Такой выбор был обусловлен необходимостью сравнения вибрационного фона опор стана и фундамента вблизи трещин и на удалении от них.



**Рис. 2. Внешний вид и размеры трещин в различных точках бетонного пола производственного участка бумагоделательной машины № 8, образовавшийся в результате вибрационного воздействия и осадки грунта**

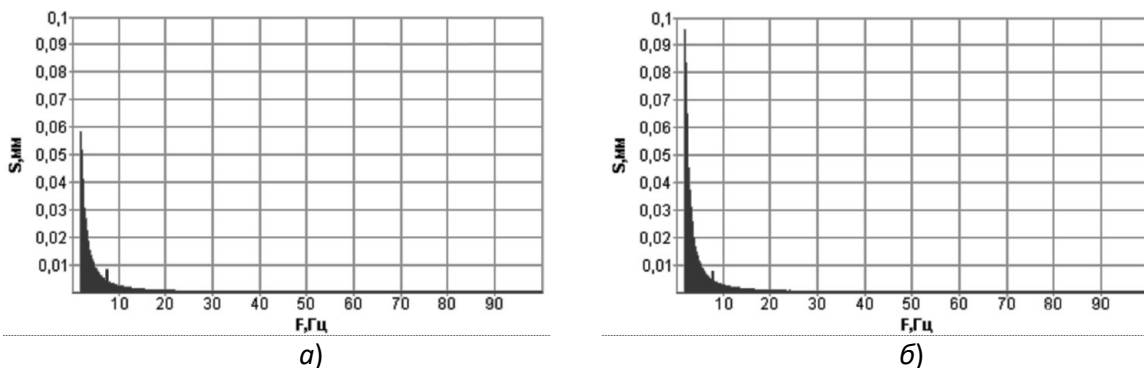


Испытания проводились посредством портативного измерительного прибора «Вибран 2.2» 10 сентября 2020 года. Внешний вид бумагоделательной машины №8 и расположение ключевых диагностических точек, где измерялась вибрация, приведены на рис. 3. Важно отметить, что вибрация измерялась в частотном диапазоне 2-100 Гц (для большей точности измерения в низкочастотном диапазоне) в вертикальном направлении, а акселерометр крепился к опорным плитам.

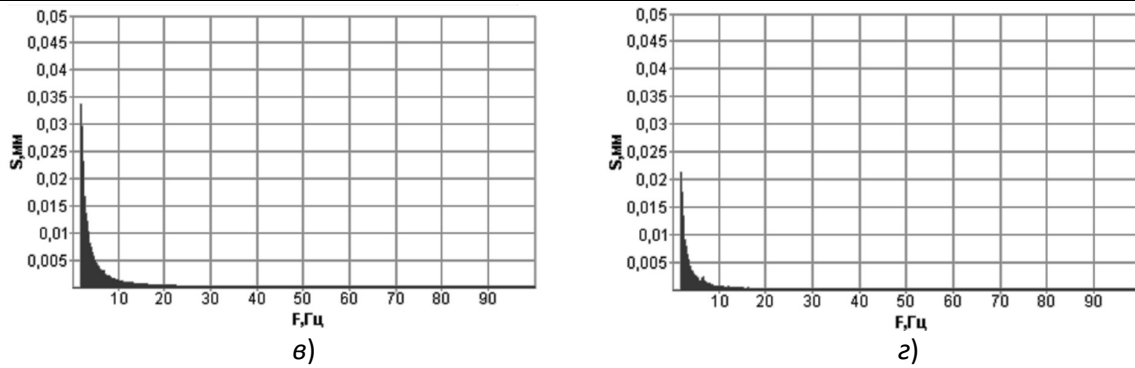


**Рис. 3. Внешний вид бумагоделательной машины № 8 с обозначением точек измерения вибрации**

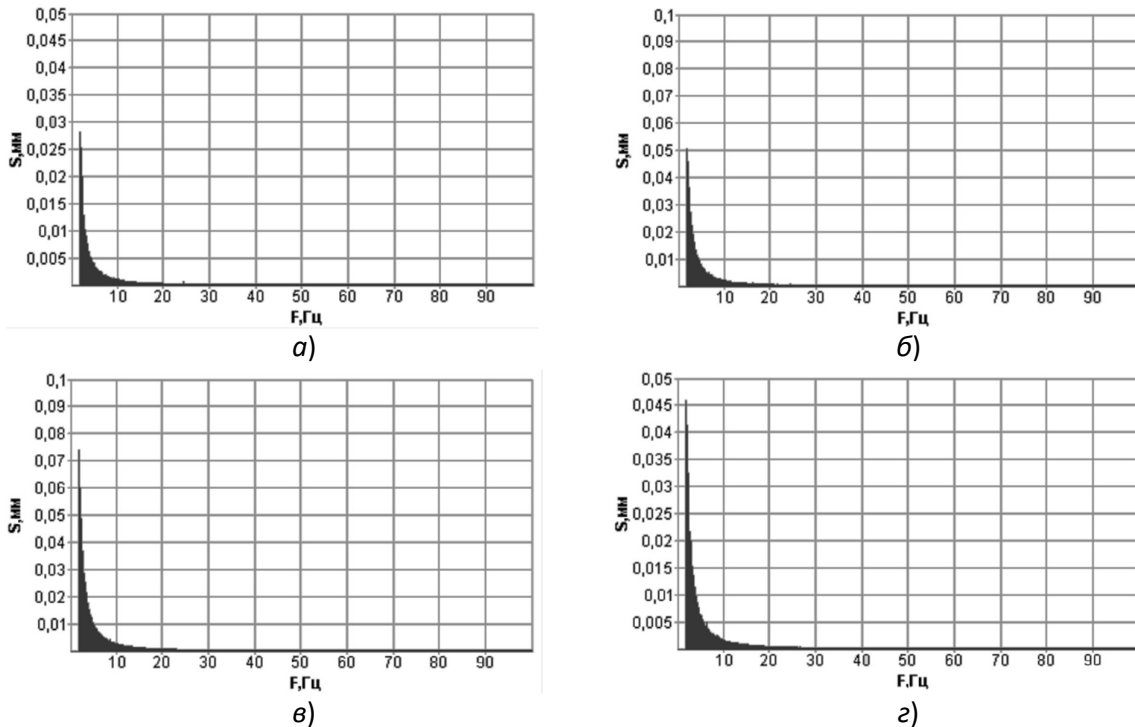
Диаграммы вибрационных сигналов, снятые посредством прибора в выбранных точках, были перенесены на компьютер, где с помощью программного обеспечения «Вибран-2.2» были получены спектрограммы записанных сигналов (рис. 4-5).



**Рис. 4. Спектрограммы вибраций 3 (а) и 4 (б) опор стана (Начало)**



**Рис. 4. Спектрограммы вибраций опор 1 (в) и 2 (з) пультов управления (Окончание)**



**Рис. 5. Спектрограммы вибраций пола в середине цеха напротив 3 (а) и 4 (б) опор стана и пола возле колонн: вблизи (в) и вдали (з) от трещины**

Обработка результатов вибрационных испытаний позволила сделать следующие предварительные выводы:

1. Амплитуда основной гармоники спектра (2 Гц) не превышает 0,1 мм и составляет возле стана 0,05-0,1 мм, возле 1-го пульта 0,02 мм, возле 2-го пульта – 0,07 мм, на полу посреди цеха 0,025-0,06 мм, возле колонн – 0,05-0,07 мм, на колонне – 0,025 мм.

2. Над вибрацией значительно (в 10-100 раз) преобладают ударные случайные нагрузки, отчего вибрационная мощность сосредоточена в диапазоне 2-10 Гц.

3. Почти на всех спектрах выделяются гармоники 7-8 Гц, соответствующие частотам вращения каландрового и тамбурного валов.

4. На диаграммах, приведенных на рис. 4-5 отчетливо проявляются основные гармоники ударных импульсов частотой 2-3 Гц. Это вызвано тем, что каландровый вал приводится во вращение асинхронным двигателем мощностью 130 кВт через финский редуктор фирмы Santasalo Gears Oy модели 1RG-560 с коэффициентом редукции  $k_r = 2,888$ . Угловая скорость вращения вала асинхронного двигателя соответствует  $\approx 20,2$  об/с (20,2 Гц). Угловая скорость каландровых валов соответствует  $\approx 7-8$  об/с (7-8 Гц).

5. Низкие уровни вибраций в измеряемых точках и их малые частоты объясняются огромными значениями масс (от 15 тонн и выше) вибровозмущающих и вибропроводящих объектов.

Поскольку линейная скорость перемещения целлюлозы, наматываемой на тамбурный вал) составляет 1320 м/мин, при диаметре 0,95 м и радиусе 0,475 м каждого тамбурного вала [1], то угловая скорость каландровых валов соответствует 7 об/с (7 Гц). Поэтому на спектрах виброперемещений, представленных на рис. 4-5, основные гармоники вибраций выделяются в полосе частот до 10 Гц. На данных на спектрах виброперемещений наблюдается действие случайных ударных нагрузок.

Предположительно причиной вибрации является износ подшипников (особенно каландровых валов 3-й опоры), поскольку трещина в полу появилась после достаточно долгой (более 25 лет) эксплуатации машины.

### **Обоснование выводов при определении причины возникновения вибрации подшипников**

Вибрация подшипников с частотой вращения может возникать вследствие одной из трех причин: проскальзывание кольца в посадочном месте, обкатывание наружного кольца или износ внутреннего кольца [2]. Последние две причины сопровождаются изменением геометрии подшипника и, следовательно, возникновением эксцентриситета вала.

Различают два вида эксцентриситета: статический, характеризующийся радиальным или угловым смещением оси вращения ротора относительно оси статора, и динамический, характеризующийся изменяющимся во времени положением оси вращения ротора относительно оси статора [3,4]. Очевидно, что наиболее опасным является динамический эксцентриситет вала, поскольку при его вращении возникает сила инерции, оказывающая дополнительное силовое воздействие на элементы конструкции и раскачивающая ее. Сила, возникающая при вращении неуравновешенного вала с динамическим эксцентриситетом, меняется по направлению с периодом, соответствующим полному обороту вала и

пропорциональна квадрату скорости его вращения. Статический эксцентриситет не существенно влияет на работу машины.

Рассмотрим физическую модель вращения ротора мощного асинхронного двигателя, обладающего некоторым эксцентриситетом. Как правило, параметр эксцентриситета выражается через произведение  $m_1 \cdot r_1$ , где  $m_1$  – масса ротора, а  $r_1$  – расстояние между осью ротора и осью его вращения [5]. Для упрощения расчетов допустим, что эксцентриситет вала вызван эксцентриситетом (грузом) массой  $m_0$ , установленным на расстоянии от оси вращения ротора  $r_e$  (рис. 6).

Двигатель с неуравновешенным ротором установлен на столе посредством опор, описываемых вязко-упругими связями. Таким образом, при вращении ротора двигатель способен совершать колебания по нормали к плоскости стола. Сам же стол в процессе работы двигателя раскачивается под действием сил инерции со стороны последнего.

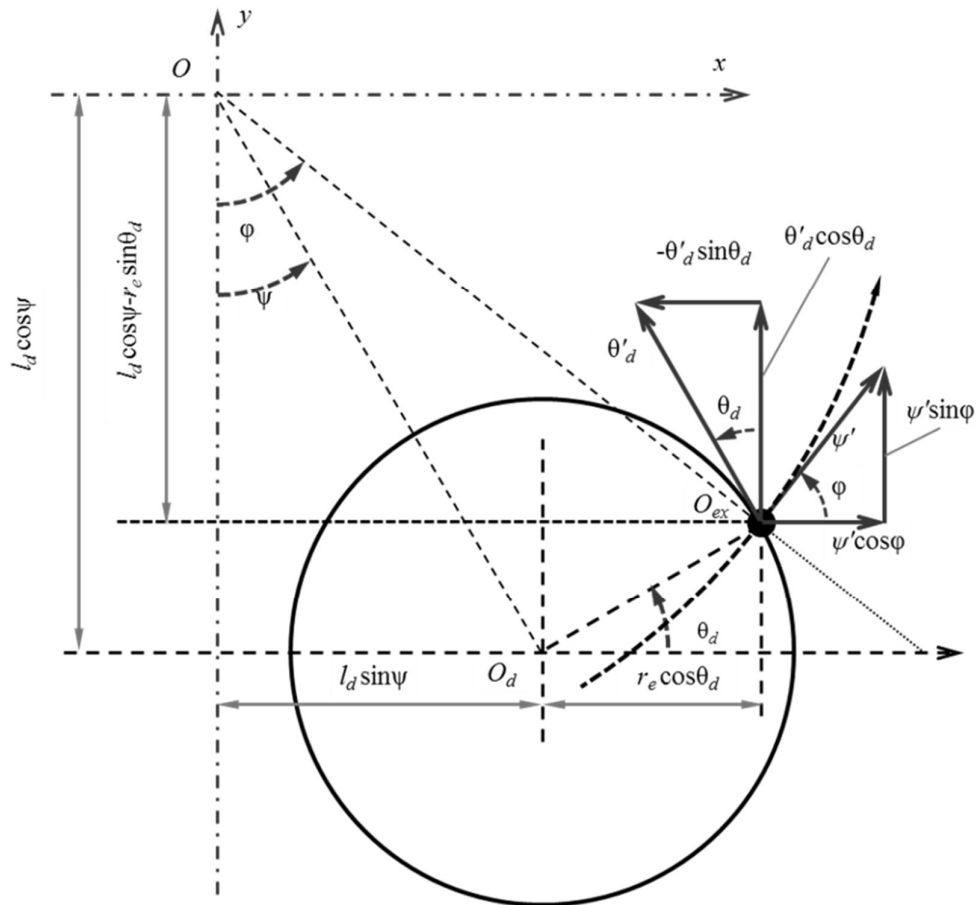


Рис. 6. Разложение сложного движения эксцентрика по векторам линейных скоростей в системе координат  $xu$

Разложение сложного движения эксцентрика на составляющие по осям  $x$  и  $y$  графически поясняется на рис. 6. Расстояние от центра тяжести стола  $O$  до текущего положения эксцентрика  $O_{ex}$  (плечо  $OO_{ex}$  длиной  $l_{ex}$ ) и функции угла  $\varphi$  отклонения эксцентрика от вертикальной оси симметрии при качании определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 l_{ex} &= \sqrt{\left(l_d \cos \psi - r_e \sin(\psi + \theta_d)\right)^2 + \left(l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)\right)^2}, \\
 \sin \varphi_{ex} &= \frac{l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)}{l_{ex}}, \\
 \varphi_{ex} &= \arcsin \left[ \frac{l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)}{l_{ex}} \right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\psi$  – угол наклона стола,  $\theta_d$  – угол поворота ротора двигателя,  $r_e$  – расстояние от оси вращения ротора до центра масс дебаланса,  $l_d$  – расстояние от центра тяжести стола до оси вращения ротора (плечо  $OO_d$ ).

Длина плеча  $l_{ex}$  и угол отклонения  $\varphi$  являются переменными величинами, зависящими от углов качания  $\psi$  и поворота ротора двигателя  $\theta_d$ . Производные этих величин по времени выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 l'_{ex} &= \frac{-l_d r_e \cos \theta_d \theta'_d}{l_{ex}}, \\
 \varphi'_{ex} &= \frac{l_d l_{ex} \cos \psi \psi' - r_e l_{ex} \sin(\psi + \theta_d)(\psi' + \theta'_d)}{l_{ex} \sqrt{l_{ex}^2 - [l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)]^2}} - \\
 &\quad - \frac{[l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)] l'_{ex}}{l_{ex} \sqrt{l_{ex}^2 - [l_d \sin \psi + r_e \cos(\psi + \theta_d)]^2}}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

С учетом (1) и (2) выражение для кинетической энергии движущихся масс системы (рис. 6) может быть представлено в следующем виде [6]:

$$\begin{aligned}
 W_{0.ex}^k &= \frac{1}{2} m_0 (x'^2 + y'^2) + \frac{1}{2} j_0 \psi'^2 + \frac{1}{2} j_d \theta_d'^2 + \\
 &\quad + \frac{1}{2} m_e \left( (x' + l_{ex} \psi' \cos \varphi - r_e \theta_d' \sin \theta_d)^2 + (y' + l_{ex} \psi' \sin \varphi + r_e \theta_d' \cos \theta_d)^2 \right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $x$  и  $y$  – перемещения двигателя относительно горизонтальной и вертикальной оси соответственно,  $j_0$  – момент инерции качающегося стола, момент инерции вращающегося ротора  $j_d$ .

Потенциальная энергия обуславливается сжатием и растяжением опор ротора двигателя, так что её выражение представляется в виде:

$$W_{0.ex}^p = \frac{1}{2} k_{0x} x^2 + \frac{1}{2} k_{0y} y^2 + \frac{1}{2} k_{0\psi} \psi^2, \tag{4}$$

где  $k_{0x}$  и  $k_{0y}$  – результирующие коэффициенты упругости опор ротора по горизонтали и вертикали,  $k_{0\psi}$  – результирующий коэффициент упругости опор, противодействующих раскачиванию этого ротора.

Система подвергается и воздействию других сил: демпфированию в опорных узлах [6]:

$$f_{\mu x} = \mu_x x', \quad f_{\mu y} = \mu_y y', \quad f_{\mu \psi} = \mu_\psi \psi', \tag{5}$$

действию электромагнитного момента  $h_{ad}$  и момента нагрузки  $q_{ad}$  на валу асинхронного двигателя [5]:

$$h_d = h_{ad} - q_{ad}, \quad (6)$$

где  $\mu_x, \mu_y, \mu_\psi$  - результирующие коэффициенты демпфирования опор в направлениях  $x, y$  и  $\psi$ . В первом приближении предполагается, что силы противодействия взаимным перемещениям корпусов опор зависят от скорости, а выделяемая энергия пропорциональна величине этих перемещений. При электромеханическом преобразовании энергии в асинхронном двигателе также проявляется эффект демпфирования. Дело в том, что формирование электромагнитного момента происходит в результате взаимодействия токов обмоток статора и ротора. В активных сопротивлениях этих цепей при протекании токов возникают потери, обуславливающие эффект диссипации энергии.

В соответствии с принципом Лагранжа для каждой независимой координаты, или переменной состояния, с учетом (5) и (6), справедливы следующие уравнения динамического равновесия (кинетостатики):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial x'} - \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial x} + \frac{\partial W_{0.ex}^p}{\partial x} &= f_x, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial y'} - \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial y} + \frac{\partial W_{0.ex}^p}{\partial y} &= f_y, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial \psi'} - \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial \psi} + \frac{\partial W_{0.ex}^p}{\partial \psi} &= f_\psi, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial \theta'_d} - \frac{\partial W_{0.ex}^k}{\partial \theta_d} &= h_{ad} - q_{ad}. \end{aligned} \quad (7)$$

С помощью уравнений (3), (4) и (7) была проведена оценка кинематических и энергетических процессов в системе с асинхронным двигателем мощностью 130 кВт, обеспечивающим вращение каландрового вала массой 29,5 тонн на предельно допустимой скорости 500 об/мин (при скорости протяжки бумаги 1320 м/мин) [1]. На основании пересчитанных значений перемещений валов двигателей были определены ресурсы подшипников, используемых (или пригодных к использованию) на исследуемой бумагоделательной машине, по формуле (пренебрегая осевой составляющей нагрузки) [7]:

$$L = \left( \frac{C}{P} \right)^p, \quad (8)$$

$$P \approx (XVF_r) K_B K_T,$$

где  $L$  – долговечность в миллионах оборотов,  $C$  – динамическая грузоподъемность,  $P$  – динамическая нагрузка,  $p = 3$  для шариковых подшипников,  $X$  – коэффициент нагрузки,  $F_r$  – радиальная нагрузка,  $V$  – коэффициент вращения,  $K_B$  – коэффициент безопасности,  $K_T$  – температурный коэффициент.

Радиальная нагрузка, в свою очередь, представляет собой вибрационное воздействие со стороны вала и может быть определена по формуле [8]:

$$F_r = S \cdot \frac{(2\pi f)^2}{2} \cdot m, \quad (9)$$

где  $S$  – среднеквадратичное значение виброперемещения,  $f$  – частота основной гармоники вибрации,  $m$  – масса вала.

Так, для подшипника 718/500-МР шведского производства SKF при эксцентриситете  $S = 0,05$  мм расчетный ресурс составляет 1280,7 миллионов оборотов, для отечественного подшипника 10668/500Л – 734,3 миллионов оборотов, для немецких подшипников 230/500-ВЕА-ХЛ-К-МВ1 – 2241538,2 миллионов оборотов (однако номинальная частота вращения таких подшипников меньше скорости вращения каландрового вала (500 об/мин)) [9]. Таким образом, при непрерывном вращении подшипников в течение 12 часов каждый день они совершали 360000 оборотов и, работая в таком режиме, отработали свой ресурс за 10 лет. Бумагоделательный стан же эксплуатировался на протяжении 26 лет (с 1994 года) без замены подшипников, что, в конечном счете, и привело к усилению вибрации в них.

### Заключение

Была проведена вибродиагностика бумагоделательной машины №8, расположенной на бумкомбинате «Волга». Первичный анализ спектрограмм вибраций в разных точках цеха показал, что колебания наибольшей амплитуды возникают вблизи опор, удерживающих средние каландровые валы машины, вращающиеся со скоростью 500 оборотов в минуту. Эти гармоники выделяются и на спектрограммах. В целом, над вибрациями значительно преобладают ударные нагрузки, проявляющиеся на спектрограммах гармоническими составляющими в частотной области от 2 до 10 Гц.

Были предложены математические модели, предназначенные для оценки динамических механических процессов в колебательной системе с неуравновешенными валами, вызывающими при своем кручении как поступательные, так и вращательные движения отдельных ее элементов.

Было установлено, что основной причиной вибрации бумагоделательного стана «Voith» является увеличение дисбаланса ротора асинхронного двигателя мощностью 130 кВт, приводящего в движение средние каландровые валы машины. Именно в этой области и была обнаружена наибольшая вибрация с частотой вращения вала. Увеличение эксцентриситетов, усугубляемое ударными нагрузками, способствовало разрушению подшипников, на которых укреплены валы. Опыт эксплуатации бумагоделательной машины №8 и всего цеха в целом в будущем может помочь заблаговременно предотвращать возникновение предаварийных ситуаций на других предприятиях, оснащенных массивными производственными комплексами.

**Библиографический список**

1. Официальный сайт АО «Волга» - Балахнинский бумкомбинат. Оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://volga-paper.ru/company/production/equipment/> (дата обращения: 29.12.2020)
2. **Каминский С.Г.** Разработка методов вибродиагностирования и восстановления электроприводных нефтепромысловых насосных агрегатов : автореф. дис. .. канд. техн. наук : 05.02.13 / С.Г. Каминский. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. 24 с. ил.
3. **Васьковский, Ю.Н.** Вибродиагностика эксцентриситета ротора асинхронных машин на основе анализа вибровозмущающих сил / Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. // Збірник наукових праць «Вісник НТУ «ХП»»: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2014, №38, С. 52-62.
4. **Шуйский В. П.** Расчет электрических машин / пер. с нем. Л.: Энергия. 1968. 732 с.
5. Байков А.И. Анализ вибраций двигателей, смонтированных на одном основании / А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. – 2016. С. 8 – 12.
6. **Гордеев Б.А.** Моделирование процессов испытаний виброопор на экспериментальном стенде / Б.А. Гордеев, А.И. Байков, А.Б. Дарьенков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т.5, №2. – С. 56-61.
7. ГОСТ 18855-2013 (ISO 281:2007) Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс (с Поправкой)
8. Вибро-Центр. Как пересчитать виброскорость в виброускорение? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://vibrocenter.ru/vibroacc\\_vel.htm](https://vibrocenter.ru/vibroacc_vel.htm) (дата обращения: 08.01.2021)
9. Официальный сайт ООО «Электропоставщик» (портал – «Кабель.РФ»). Подшипники качения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nn.cable.ru/bearings/> (дата обращения: 08.01.2021)



**B.A. Gordeev<sup>1</sup>, S.N. Okhulkov<sup>1</sup>, A.I. Ermolaev<sup>1</sup>,  
A.A. Makarskov<sup>2</sup>, A.N. Osmekhin<sup>3</sup>**

**VIBRATION DIAGNOSTICS OF PAPER-MAKING MACHINE NO. 8  
AT THE VOLGA PAPER COMPANY (BALAKHNA)**

Mechanical Engineering Research Institute of RAS<sup>1</sup>  
KOPOS-NN Ltd<sup>2</sup>  
JSC "Afrikantov OKB Mechanical Engineering"<sup>3</sup>

**Abstract:** To determine the cause of the cracks occurrence and evolution in the floor of the paper-making shop and the cause of vibration level increase of the paper-making machine at the Volga Paper Company. Vibration measurements at different points of the machine and paper-making shop were carried out using a Vibran 2.2. The measurement results were processed using spectral analysis methods in square-window mode. Modeling of mechanical processes in an oscillatory system with an unbalanced motor is carried out using the methods of theoretical mechanics and the theory of generalized coordinates. It has been established that vibration is caused by bearing wear and by eccentricity radius increase of the rotating shafts of the paper-making machine. This study deals only with acoustic processes caused by equipment operation. Consideration of the problem within the framework of structural mechanics, geodesy and non-destructive testing will be carried out in separate studies. Experience in operating paper-making machine No. 8 and the entire workshop will help to prevent the occurrence of pre-emergency situations in the future at other facilities equipped with massive manufacturing complexes.

**Key words:** vibration diagnostics, vibrations, shock loads, shaft eccentricity, electric motor, induction motor, bearing wear, paper-making machine

**References**

- [1] Oficial'nyj sajt AO «Volga» - Balahninskij bumkombinat. Oborudovanie [The official site of JSC Volga – paper-making company. Equipment] [Online]. – Available at: <http://volga-paper.ru/company/production/equipment/> (Accessed: Dec. 29, 2020) (in Russian)
- [2] Kaminskij S.G. “Razrabotka metodov vibrodiagnostirovaniya i vosstanovleniya elektroprivodnyh neftepromyslovyh nasosnyh agregatov [Development of methods for vibration diagnostics and restoration of electric driven oilfield pumping units]”: avtoref. dis. .. kand. tekhn. nauk : 05.02.13 / S.G. Kaminskij. - Ufa: Izd-vo UGNTU, 2004. 24 p. (in Russian)
- [3] Vas'kovskij YU.N., Geraskin A.A. “Vibrodiagnostika ekscentrisiteta rotora asinhronnyh mashin na osnove analiza vibrovozmushchayushchih sil [Vibration diagnostics of the eccentricity of the rotor of asynchronous machines based on the analysis of vibration disturbing forces]” *Zbirnik naukovih prac' “Visnik NTU “HPI”: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorenniya energii” [Electromechanical transformers]*, 2014, №38, pp. 52-62 (in Ukrainian)
- [4] Shujskij V. P. Raschet elektricheskikh mashin [Electrical motors design] / per. s nem. L.: *Energiya [Energy]*. 1968. 732 p. (in Russian)
- [5] A.I. Bajkov, A.B. Dar'enkov, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov, B.A. Gordeev, S.N. Ohulkov “Analiz vibracij dvigatelej, smontirovannyh na odnom osnovanii [Analysis of vibrations of motors mounted on single base]” *Trudy IX mezhdunarodnoj (XX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive]* – 2016. pp. 8 – 12 (in Russian)
- [6] B.A. Gordeev, A.I. Bajkov, A.B. Dar'enkov “Modelirovanie processov ispytaniy vibroopor na eksperimental'nom stende [Modeling of the hydromounts vibration test processes at the

- 
- experimental stand]” *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal [Mechanical engineering]*. – 2017. – vol.5, №2. – pp. 56-61 (in Russian)
- [7] GOST 18855-2013 (ISO 281:2007) Rolling bearings. Dynamic Load Ratings and Rated Life (Adjusted) (in Russian)
- [8] Vibro-Centr. Kak pereschitat' vibroskorost' v vibrouskorenie? [Vibro-Center. How to convert vibration velocity to vibration acceleration?] [Online]. – Available at: [https://vibrocenter.ru/vibroacc\\_vel.htm](https://vibrocenter.ru/vibroacc_vel.htm) (Accessed: Jan. 08, 2021) (in Russian)
- [9] Oficial'nyj sajt OOO «Elektropostavshchik» (portal – «Kabel'.RF»). Podshipniki kacheniya. [Official site of LLC "Elektropostavshchik". Rolling bearings.] [Online]. – Available at: <https://nn.cable.ru/bearings/> (Accessed: Jan. 08, 2021) (in Russian)

А.И. Ермолаев<sup>1</sup>, В.И. Ерофеев<sup>1</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА СНИЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВИБРАЦИЙ СТАТОРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Институт проблем машиностроения Российской Академии Наук<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье рассмотрены причины возникновения радиальных магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей. Приведено математическое описание процесса возбуждения магнитных вибраций статоров. Описан способ снижения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей, основанный на изменении спектрального состава питающего напряжения статорной обмотки электродвигателя и активном гашении наиболее интенсивных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре машины.

**Ключевые слова:** магнитная вибрация, вибровозмущающая сила, порядок пространственных гармоник, активное гашение, асинхронный двигатель.

### Введение

Магнитная вибрация, связанная с магнитострикцией стали статора, является проблемой практически всех электрических машин средней и большой мощности [1-4]. Она приводит к множеству неблагоприятных явлений: изменению гармонического состава питающего тока, износу подшипников, акустическому шуму, увеличению потребляемой мощности и разрушению электродвигателей [2-4].

Особенно сильно магнитная вибрация проявляется в асинхронных электродвигателях (АД), характеризующихся вращающимся магнитным полем относительно неподвижного статора машины. Вибровозмущающая сила вызывает в таких машинах периодическую деформацию статоров, проявляющуюся, прежде всего, в виде акустического шума. Однако известно, что амплитуда магнитных вибраций статора АД может превышать 0,3 мм [3].

Изучению магнитной вибрации и разработке методов и средств по борьбе с ними посвящено достаточно много работ как зарубежных, так и отечественных ученых. В 70-80 гг. такие ученые, как И.Г. Шубов, Н.В. Астахов, В.С. Малышев, Н.Я. Овчаренко и другие, заложили обширную фундаментальную базу по математическому описанию магнитных вибраций электрических машин, конструкционным способам их снижения [1,4,5]. В 90-00 гг. в трудах таких исследователей, как D. Belkhat, V. Cassoret, R. Corton, K.C. Maliti, D. Roger были раскрыты способы активного снижения магнитной вибрации статора АД путем воздействия на гармонический состав питающего тока специальным компенсирующим сигналом [3,6,7]. Так, метод Белкхата, основанный на расчете

вибровозмущающей силы по току статора, функционирует в узком частотном диапазоне, имеет сложную систему управления, использует датчик Холла и микрофон, позволяя уменьшить определенную гармонику радиальной силы в 10 раз. Метод Кассорета, основанный на расчете магнитной индукции по значениям ЭДС и МДС обмоток статора и ротора, вариативен и подходит для любых типов АД. Для определения виброактивных гармоник метод предполагает использование датчика вибрации, обеспечивает гашение гармоник силы в 2-3 раза в широком диапазоне частот. Вместе с тем, технически этот метод так и не был реализован.

Совершенно иные подходы предлагают методы, предложенные в работах последнего десятилетия, подготовленных такими авторами, как D. Franck, К. Nemeuer, В.В. Давыдов, Н.А. Доброскок [2,8]. В работах этих исследователей рассматривается управление магнитной вибрацией путем заданного изменения углов и напряжений в системе векторного управления асинхронным электроприводом. Метод Фрэнка предполагает расчет вибрации через функции МДС и магнитных проводимостей в двигателе и позволяет уменьшить вибровозмущающую силу в два раза. Метод характеризуется сложностью из-за большого числа расчетов и на практике так и не был реализован. Метод Доброскока основан на управлении углами фазных напряжений на векторной диаграмме АД и позволяет снизить магнитную вибрацию статора в широком спектре частот на несколько дБ. Работоспособность метода подтверждена экспериментально, но его эффективность оказалась довольно низкой ввиду воздействия на вибровозмущения в широком диапазоне частот.

Целью данной статьи является разработка нового способа снижения магнитной вибрации статоров АД путем изменения спектрального состава питающего тока с использованием устройства, выполняющего быстрое преобразование Фурье, с возможностью реализации на схеме с цифровой обработкой сигналов.

### **Возбуждение магнитной вибрации в асинхронном двигателе**

Пульсирующие и вращающиеся магнитные силы в бездефектных АД являются основными источниками их вибрации [4,9]. Наиболее интенсивными являются радиальные силы, создающие колебания корпуса статора, пропорциональные квадрату магнитной индукции  $B$  в зазоре АД [3,4,10]:

$$F_r(x,t) = \frac{B^2(x,t)}{2 \cdot \mu_0}. \quad (1)$$

Одним из направлений снижения виброактивности этих электрических машин является управление спектром магнитного поля в воздушном зазоре [3,10]. Наиболее распространенным ввиду гибкости и простоты реализации является метод активного уменьшения вибраций АД, основанный на управлении током статора, при котором к основной гармонике тока добавляется дополнительная компенсационная гармоника или несколько гармоник, формируемых ШИМ. Сущность этого метода подробно описана в работах [7,8].

Вибровозмущающая сила, порождаемая магнитным полем в воздушном зазоре АД при его питании от преобразователя частоты (ПЧ) с учетом компенсационной гармоники  $B^i$ , будет равна:

$$F_r(x,t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \left( B_1(x,t) + B^i(x,t) + \sum_{g=2}^{\infty} B_g(x,t) \right)^2, \quad (2)$$

где,  $g$  – номер гармоники индукции магнитного поля,  $x$  – угловая координата рассматриваемой точки воздушного зазора (рад.),  $B_1(x,t)$  – первая гармоника магнитного поля в зазоре АД, порожденная синусоидальным током статора,  $B^i(x,t)$  – вводимая  $i$ -я гармоника магнитного поля,  $B_g(x,t)$  – гармоники магнитного поля высшего порядка, обусловленные зубчатостью ротора, неравномерностью зазора и т.д.

Поскольку вводимый ток имеет малые амплитудные значения (не более 15% от амплитуды питающего тока [2,7,8]), предположим, что амплитуды гармоник вибровозмущающих сил, определяемые амплитудами индукции магнитного поля в воздушном зазоре со значением  $B_m^2 / (4 \cdot \mu_0)$  и  $B_m^i \cdot \sum B_{mg} / (2\mu_0)$  пренебрежительно малы. Значительное влияние оказывают всего две гармоники вибровозмущающей силы, порожденные взаимодействием основной гармоники магнитного поля и компенсационной гармоники поля. Эти гармоники описываются уравнениями вида:

$$F_r^i(x,t) = \frac{B_m^i \cdot B_{m1}}{2\mu_0} \cdot \left( \cos \left[ 2 \cdot Z_p \cdot x - (\omega^i + \omega_1) \cdot t - (\varphi^i + \varphi_1) \right] + \cos \left[ -(\omega^i - \omega_1) \cdot t - (\varphi^i - \varphi_1) \right] \right), \quad (3)$$

где  $B_g$  – амплитуда  $g$ -й гармоники,  $Z_p$  – число пар полюсов АД,  $\omega_1$  – угловая частота магнитного поля в зазоре,  $\varphi_g$  – начальная фаза магнитного поля в зазоре для  $g$ -й гармоники,  $\omega^i$  – частота вводимой гармоники магнитного поля,  $\varphi^i$  – начальная фаза вводимой гармоники магнитного поля.

Данные гармоники вибровозмущающей силы имеют порядки пространственных колебаний  $2 \cdot Z_p$  и 0 соответственно.

Далее необходимо аналитически определить наиболее выраженную гармонику вибровозмущающей силы. Для этого необходимо знать ее основные параметры, а именно частоту, амплитуду и начальную фазу:

$$F_r(x,t) = F_m \cdot \cos(r \cdot x - \omega \cdot t - \varphi), \quad (4)$$

где  $F_m$  – амплитуда вибровозмущающей силы,  $r$  – порядок пространственных колебаний,  $\omega$  – частота колебаний вибровозмущающей силы,  $\varphi$  – начальная фаза вибровозмущающей силы.

Гармоника с порядком пространственных колебаний 0 согласно [2,4] останется и будет вызывать вибрации, но с амплитудой, много меньшей по сравнению с силой (4).

Порядок пространственных колебаний  $r = 0$ , обусловленный интерференцией двух гармоник индукции магнитного поля в зазоре АД с одинаковыми пространственными периодами (волновыми числами), подразумевает равномерную радиальную деформацию статора вдоль всего воздушного зазора. Радиальные

силы второго порядка ( $r = 2$ ) и выше вызывают изгибные деформации статора. При таких колебаниях средняя линия сечения статора стремится принять форму правильного  $r$ -угольника [4], как показано на рисунке 1.

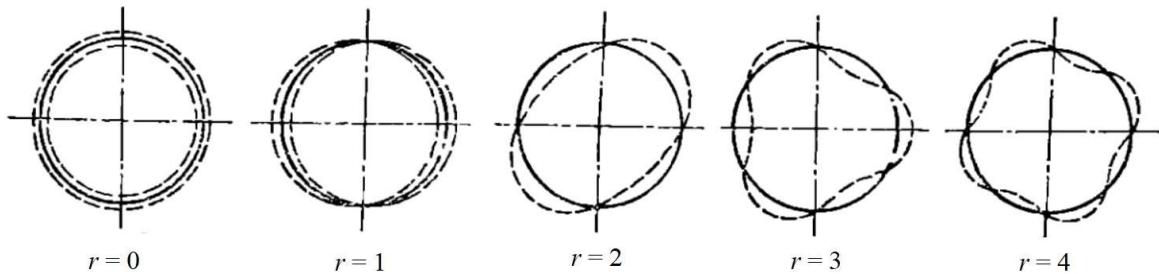


Рис. 1. Формы колебаний статора электрических машин

Индукция электромагнитного поля в некоторой точке воздушного зазора АД  $x$  в момент времени  $t$  может быть найдена как произведение мгновенного значения суммарной магнитодвижущей силы (МДС) статорной и роторной обмоток и удельной магнитной проводимости воздушного зазора с учетом его зубчатости [2,11]:

$$B(x,t) = F(x,t) \cdot \Lambda(x,t), \quad (5)$$

где  $F(x,t)$  – совокупная МДС обмоток статора и ротора,  $\Lambda(x,t)$  – удельная магнитная проводимость в воздушном зазоре АД.

Радиальная компонента вибровозмущающей силы рассчитывается с применением метода гармонических проводимостей. Метод гармонических проводимостей основан на разложении функции проводимости в зубчатом воздушном зазоре в ряд Фурье [11].

Упрощенная формула для расчета магнитной проводимости с учетом нескольких гармоник  $n$  и коэффициента сглаживания  $(1 - \rho / n)$  имеет вид [2]:

$$\Lambda(x,t) = \Lambda_{01} \cdot \left( 1 - \sum_{\rho=1}^{\infty} \lambda_{\rho} \cdot \left( 1 - \frac{\rho}{n} \right) \cdot \cos(\rho \cdot z_1 \cdot x) \right), \quad (6)$$

где  $\Lambda_{01} = \mu_0 / (k_{\delta 1} \cdot \delta_0 \cdot k_{\text{нас}})$  – постоянная составляющая магнитной проводимости в воздушном зазоре,  $\lambda_{\rho}$  – коэффициент ряда Фурье с учетом конструктивных особенностей АД,  $\rho$  – порядок гармоники ряда Фурье,  $k_{\delta 1}$  – коэффициент зазора с односторонней зубчатостью,  $k_{\text{нас}}$  – коэффициент насыщения.

Поскольку МДС обмоток АД определяется величиной и формой токов в них, в процессе расчетов нужно учитывать гармонический состав питающего напряжения. Высшие гармоники вызывают в статорной обмотке гармонические составляющие тока статора  $I_{1g}$ . Эти гармоники тока порождают пульсации магнитного индукции поля в зазоре АД как на частоте, соответствующей частоте  $g$ -й гармоники питающего напряжения, так и на других частотах, вызванных наличием пазов у статора и ротора, статическим и динамическим эксцентриситетом, магнитным насыщением в зазоре и т.д. Гармоники индукции магнитного поля в статоре вызывают в короткозамкнутой обмотке ротора основную гармонику тока  $I_{2g0}$ , а также ряд высших токовых гармоник. Следовательно, при несинусоидальном напряжении питания в воздушном зазоре АД имеют место высшие гармонические составляющие магнитного поля статора порядка пространственных

колебаний  $\nu$  и магнитного поля ротора порядка  $\mu$ , индуцированные гармоническими составляющими питающего напряжения порядка  $g$  с амплитудой  $U_{1mg}$  и частотой  $\omega_{1g}$ .

Согласно [1,2], МДС статорной и роторной обмоток с учетом несинусоидальности питающего напряжения рассчитываются по выражению:

$$F(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{1mg\nu} \cdot \cos(Z_p \cdot \nu \cdot x - g \cdot \omega_0 \cdot t - \varphi_{g\nu}) + \sum_{g=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{2mg\mu} \cdot \cos(Z_p \cdot \mu \cdot x - \omega_{2g\mu} - \varphi_{g\mu}), \quad (7)$$

где  $F_{1mg\nu}$  и  $F_{2mg\mu}$  – амплитуды  $\nu$ -й гармоники МДС статора и  $\mu$ -й гармоники МДС ротора соответственно:

$$F_{1mg\nu} = \frac{m_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_1 \cdot k_{о\delta\nu} \cdot I_{1g}}{\pi \cdot Z_p \cdot \nu}, \quad F_{2mg\mu} = \frac{m_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_1 \cdot k_{о\delta\mu} \cdot I_{2\mu}}{\pi \cdot Z_p \cdot \mu}.$$

Посредством перемножения функций магнитной проводимости воздушного зазора АД (6) и суммарной МДС статорной и роторной обмоток (7), согласно (5) получим пространственно-временное распределение индукции магнитного поля в зазоре АД с учетом несинусоидальности питающего напряжения и равномерного распределения пазов по длине зазора [1,2]:

$$B(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\rho=0}^n B_{1mg\nu} \cdot \cos(r_{1\nu} \cdot x - g \cdot \omega_1 \cdot t - \varphi_{1g\nu}) + \sum_{g=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \sum_{\rho=0}^n B_{2mg\mu} \cdot \cos(r_{2\mu} \cdot x - g \cdot \omega_{2g\mu} \cdot t - \varphi_{2g\mu}), \quad (8)$$

где  $r_{1\nu}$  и  $r_{2\mu}$  – порядки пространственных гармоник магнитной индукции в зазоре АД, равные  $r_{1\nu} = Z_p \cdot \nu$  и  $r_{2\mu} = Z_p \cdot \mu$ .

Радиальная составляющая вибровозмущающей силы, порожденная взаимодействием основных гармоник полей статора и ротора в случае несинусоидального напряжения питания без учета зубцовых гармоник магнитных полей статора и ротора, определяется путем подстановки (8) в (1) и описывается выражением следующего вида:

$$F_r(x, t) = \frac{1}{4 \cdot \mu_0} \sum_{g_1=1}^{\infty} B_{1mg_1}^2 \left( 1 + \cos(2 \cdot Z_p \cdot x - 2 \cdot g_1 \cdot \omega_0 \cdot t - 2 \cdot \varphi_{g_1}) \right) + \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \sum_{g_1=1}^{\infty} \sum_{g_2=1}^{\infty} B_{1mg_1} \cdot B_{1mg_2} \cdot \cos((Z_p \pm Z_p) \cdot x - (g_1 \pm g_2) \cdot \omega_0 \cdot t - (\varphi_{g_1} \pm \varphi_{g_2})) + \frac{1}{4 \cdot \mu_0} \sum_{g_2=1}^{\infty} B_{2mg_2}^2 \left( 1 + \cos(2 \cdot Z_p \cdot x - 2 \cdot g_2 \cdot \omega_0 \cdot t - 2 \cdot \varphi_{g_2}) \right). \quad (9)$$

Выражение (9) может быть упрощено до следующего вида:

$$F_r(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} F_{rgm} \cdot \cos(r_g \cdot x - \omega_g \cdot t - \varphi_g), \quad (10)$$

где  $F_{rgm}$  – амплитуда  $g$ -й гармоники радиальной силы,  $r_g$  и  $\omega_g$  – ее порядок и частота.

Вибровозмущающие силы одного гармонического состава вызывают вибрации АД другого гармонического состава [3,4]. Это связано с тем, что статор АД имеет свою амплитудно-частотную характеристику с одной или несколькими

собственными частотами, а, следовательно, спектральный состав магнитных сил может разительно отличаться от гармонического состава вибраций статора АД.

При пространственных колебаниях порядка  $r = 2$  и более статор претерпевает деформации сложной пространственной формы  $r$ -угольника с собственной частотой, равной [4]:

$$\omega_r = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_{cm}^4}}, \quad (11)$$

где  $E$  – модуль упругости ярма статора,  $h$  – высота спинки статора,  $R_{cm}$  – внешний радиус статора,  $m$  – приведенная масса ярма статора, определяемая по формуле:

$$m = \frac{m_{cm}}{2 \cdot \pi \cdot R_{cm} \cdot l_t}. \quad (12)$$

Анализ выражения (11) позволяет сделать вывод о том, что наибольшей виброактивностью характеризуются колебания с порядком  $r = 2$ , так как их частота ниже, чем у прочих форм колебаний [2,4]. Вместе с тем, в случае питания АД от ПЧ значительное влияние на виброактивность статора оказывают и колебания порядка  $r = 2 \cdot Z_p = 4$ .

Механический импеданс  $z_\omega$  статора на частоте  $\omega$  возбуждающих сил будет определяться следующим образом:

$$z_\omega = \omega \cdot m - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{cm}} = \omega \cdot m - \frac{E \cdot h}{R_{cm}^2 \cdot \omega} \quad (13)$$

где  $\lambda_{cm}$  – механическая податливость статора.

Поскольку вибрации наибольшей мощности возникают вследствие взаимодействия первой и высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил вдоль воздушного зазора будет иметь следующий вид:

$$F_r(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} F_{rgm} \cdot \cos((Z_p \pm Z_p) \cdot x - (1 \pm g) \cdot \omega_0 \cdot t - (\varphi_{12} \pm \varphi_{12g})). \quad (14)$$

Амплитудные значения гармоник радиальной вибровозмущающей силы могут быть определены из соотношения:

$$F_{rgm} = \frac{B_\delta^2 \cdot R \cdot I_{12g}}{2 \cdot \mu_0 \cdot R_{cm} \cdot I_{12}}, \quad (15)$$

где  $R$  – внутренний радиус статора,  $I_{12g}$  и  $\varphi_{12g}$  – ток намагничивания и фаза  $g$ -й гармоники,  $I_{12}$  и  $\varphi_{12}$  – ток намагничивания и фаза 1-й гармоники Т-образной схемы замещения.

С использованием полученных значений  $F_{rgm}$  можно определить значения виброскоростей статора, вызванных магнитной вибрацией:

$$\dot{y} = \frac{F_{rgm} \cdot R}{z_{cm} \cdot R_{cm}}. \quad (16)$$



### Сущность способа подавления магнитной вибрации статора асинхронного электродвигателя

Как было ранее показано, амплитуда вибровозмущающей силы может быть снижена за счет добавления специального компенсационного напряжения/тока к питающему напряжению/току. В предлагаемом авторами способе компенсационный сигнал генерирует адаптивное корректирующее устройство (АКУ) посредством программного анализа, алгоритмы которого учитывают механические свойства и величину магнитного поля в зазоре АД.

В [12] был рассмотрен метод формирования компенсационного сигнала, подавляющего пульсации момента АД с использованием преобразования Фурье (ПФ) в режиме реального времени. Регистрация вибросигнала осуществляется с помощью датчика вибрации (ДВ), прикрепленного к корпусу электродвигателя или микрофона, установленного рядом с корпусом. Выходной сигнал ДВ служит основой для формирования сигнала компенсации. ПФ применяется к сигналу виброускорения, полученного с ДВ, после чего результаты спектрального анализа поступают на вход блока управления. Высшие гармоники вибросигнала отсекаются в блоке ПФ, включающем в себя фильтр низких частот.

На рис. 2 показана схема АКУ с ДВ (акселерометром) и ПФ.

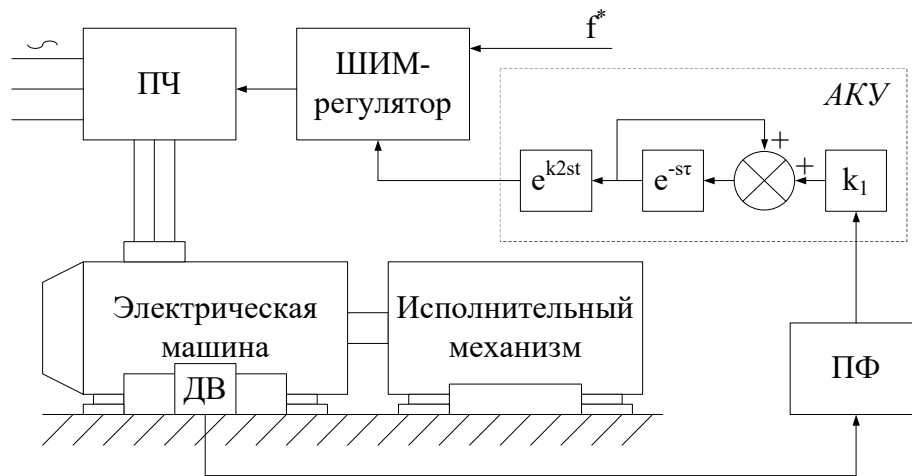


Рис. 2. Система АКУ с датчиком виброускорения и блоком ПФ

Управление снижением вибрации АД осуществляется посредством блока управления с ПЧ и ШИМ. В блоке ПФ формируется полигармонический сигнал, представляющий собой совокупность основной гармоники и определенных гармоник высших и низших порядков с учётом фазовых запаздываний. Этот полигармонический сигнал подается на цифровой фильтр, включающий усилитель  $k_1$  и компенсатор фазовой задержки  $k_2$ . Значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  выбираются для каждой гармоники вибрации, что обеспечивает высокую эффективность АКУ.

Если нагрузка на валу АД отсутствует или невелика, то индукция магнитного поля в зазоре прямо пропорциональна току намагничивания [7,8]:

$$B_{m1} = k \cdot I_{12}, \quad (17)$$

где  $k$  – конструкционный коэффициент АД.

Компенсационная гармоника магнитной индукции в воздушном зазоре АД должна иметь следующую амплитуду:

$$B_m^i = k \cdot I^i. \quad (18)$$

Амплитуда радиальной силы по (3) и (4) с учетом (17) и (18) равна:

$$F_m = F_m^i = \frac{B_m^i \cdot B_{m1}}{2 \cdot \mu_0} = \frac{B_{m1}^2 \cdot I^i}{2 \cdot \mu_0 \cdot I_{12}}. \quad (19)$$

Основной проблемой при реализации данного метода была способность подавлять только пространственные и зубцовые гармоники [1,4], не зависящие от высших временных гармоник, обусловленных несинусоидальностью напряжения питания. Использование в предлагаемом способе в качестве информативного сигнала выходного напряжения акселерометра, установленного на корпусе статора, позволяет обойти ограничения такого подхода. Функциональная схема контура АКУ, позволяющего уменьшить вибрации за счет формирования компенсационного напряжения, подавляющего высшие гармоники магнитного поля, приведена на рис 3.

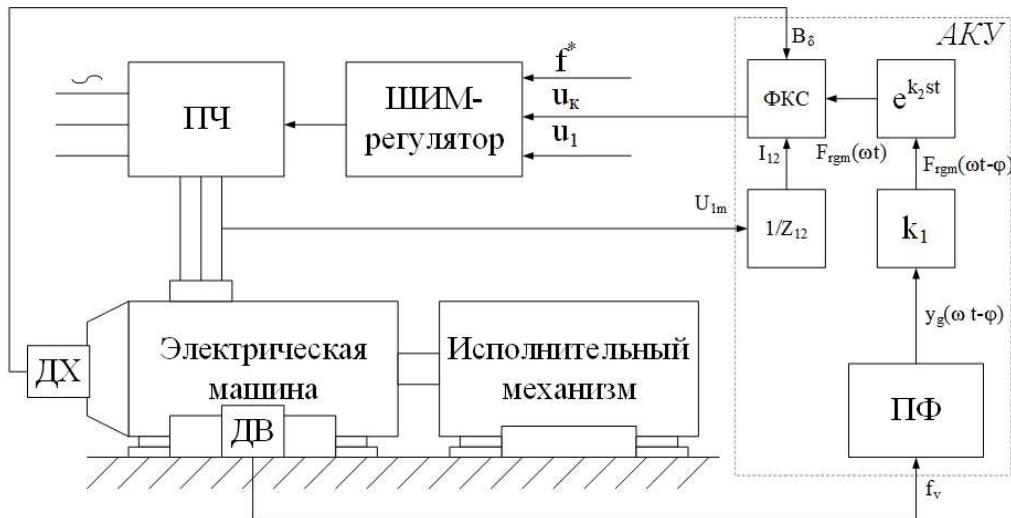


Рис. 3. Система АКУ с указанием выходных сигналов основных блоков

Поскольку формы пространственных колебаний вибровозмущающей силы в воздушном зазоре не совпадают с формами колебаний статора АД, для формирования сигнала компенсации требуется не только наличия сведений о параметрах механической системы АД, но и протекающих в нем электромагнитных процессах. Кроме того, частота основной гармоники вибраций будет равна удвоенной частоте питания АД. В общем же случае вибрации вызваны взаимодействием основной гармоники вращающегося магнитного поля и одной или нескольких гармоник высокого порядка и имеют вид:

$$F_r(x, t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \sum_{g_1=1}^{\infty} \sum_{g_2=1}^{\infty} B_{1mg_1} \cdot B_{1mg_2} \cdot \cos((Z_p \pm Z_p) \cdot x - (g_1 \pm g_2) \cdot \omega_0 \cdot t - (\varphi_{g_1} \pm \varphi_{g_2})). \quad (20)$$

Фазовая задержка, учитываемая АКУ, складывается из задержки, связанной с инерционностью конструкции статора, и задержки блока преобразования Фурье (ПФ):

$$T = k \cdot \lg(k), \quad (21)$$

где  $T$  – период дискретизации,  $k$  – количество интервалов, на которые разбивается входной сигнал времени.

Эта задержка может быть скомпенсирована в блоке фазовой компенсации  $e^{k_2st}$ . Величина фазовой задержки, вызванной инерционностью процесса деформации статора, зависит от его механических свойств:

$$F_{rgm} \cdot \cos(\omega_g \cdot t - \varphi_g) = m \cdot \ddot{y}_g(t) + \mu \cdot \dot{y}_g(t) + C \cdot y_g(t), \quad (22)$$

где  $y_g(t) = |y_g| \cdot \sin(\omega_g \cdot t - \varphi)$ ,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{m\omega - \frac{C}{\omega}}{\mu}. \quad (23)$$

Таким образом, зная форму колебаний магнитного поля в зазоре и механические параметры статора АД, можно определить компенсационную составляющую радиальной магнитной силы, созданную сигналом  $u_k$ :

$$F_r(x, t) = \sum F_{rgm} \cdot \cos(Z_p \cdot r \cdot x - \omega_g \cdot t - \varphi_g - \varphi). \quad (24)$$

Амплитуда сигнала компенсации может быть выражена через виброскорость следующим соотношением:

$$F_{rgm} = \frac{B_\delta^2 \cdot R \cdot I_{12g}}{2 \cdot \mu_0 \cdot R_{cm} \cdot I_{12}} = \dot{y}_g \cdot \frac{R}{R_{cm}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot m - C / \omega}. \quad (25)$$

Наконец, блоком формирования компенсационного сигнала (ФКС) вырабатывается задание напряжения  $u_k$ , которое вместе с основным заданием напряжения  $u_1$  поступает в БФ ШИМ. Амплитуда тока при этом определяется из следующего соотношения:

$$I_{kg} = -F_{rgm} \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot I_{12}}{B_\delta^2}. \quad (26)$$

Амплитуда поля в воздушном зазоре  $B_\delta$  измеряется датчиком Холла, тогда как ток  $I_{12}$  можно определить, согласно Т-образной схеме замещения, по значениям сопротивлений и величине питающего напряжения [9]:

$$\dot{I}_{12} = \dot{U}_1 \frac{Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_{12} + Z_{12} \cdot Z_2}, \quad (27)$$

где:

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 \\ Z_2 = R_2 / s + j \cdot X_2 \\ Z_{12} = R_{12} + j \cdot X_{12} \end{cases} \quad (28)$$

### Выводы

Разработан новый способ активного подавления магнитной вибрации в статорах асинхронных электродвигателей, заключающийся в управляемом изменении спектрального состава питающего напряжения. Предложена концепция построения адаптивного корректирующего устройства, позволяющего генерировать посредством преобразователя частоты дополнительный компенсационный ток электродвигателя для подавления гармоник магнитного поля тех пространственных и временных порядков, которые вызывают наиболее интенсивные вибрации статора. К таковым относятся вибрации статора порядков пространственных колебаний  $r = 0, 2, 4$ , определяющих форму радиальных деформаций статора, и вибрации с частотами, близкими к удвоенной частоте питающей сети и к частоте собственных колебаний ярма статора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00372).

### Библиографический список

1. **Астахов, Н. В.** Математическое моделирование вибраций асинхронных машин / Н. В. Астахов, В. С. Малышев, Н. Я. Овчаренко. – Кишинев: Штиинца, 1987. – 145 с.
2. **Доброскок, Н.С.** Алгоритмические методы снижения шумов и вибраций в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе: дисс... канд.техн.наук. СПб., 2014. 162 с.
3. **Maliti K. C.** Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation / K. C. Maliti. – Stockholm., 2000. – 209 p.
4. **Шубов, И. Г.** Шум и вибрация электрических машин / И. Г. Шубов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
5. **Астахов, Н.В.** Магнитные вибрации асинхронных электродвигателей / Н.В. Астахов, В.С. Малышев, Н.Я. Овчаренко. - Кишинев : Штиинца, 1985. - 123 с.
6. **Belkhatat, D.** Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics / D. Belkhatat, D. Roger, J. F. Brudny // Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference on. – 1997. – Sep.
7. **Cassoret V.** Magnetic noise reduction of induction machines / V. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J.-F. Brudny // Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:18, Issue:2). - 2003. - P. 570-579.
8. **Franck D.** Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors / D. Franck, M. van der Giet, K. Hameyer // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International. – 2011. – P. 1213-1218.
9. **Копылов, И. П.** Электрические машины: Учебник для вузов / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
10. **Shahaj, A.** Mitigation of vibration in large electrical machines: doctoral dissertation / A. Shahaj. – Nottingham, 2010. – 424 p.
11. Вибрация и шум электрических машин малой мощности. / Л. К. Волков, Р. Н. Ковалев, Г. Н. Никифорова и др. – Л.: Энергия, 1979. – 206 с.
12. **Tingsu S.** Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform / S. Tingsu, S. Hattori, M. Ishida, T. Hori // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – V.38, I. 5. - P. 1316 – 1325

A.I. Ermolaev<sup>1</sup>, V.I. Erofeev<sup>1</sup>, A.S. Plekhov<sup>2</sup>

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MAGNETIC NOISE REDUCTION OF STATORS OF AN INDUCTION MOTORS

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia<sup>2</sup>

**Abstract:** The article discusses the reasons of the radial magnetic vibrations occurrence in the stators of an induction motors. A mathematical description of the process of excitation of magnetic vibrations of stators is given. A method for reducing the magnetic vibrations in the stators of an induction motors is described, based on changing the spectra of the supply voltage of the motor and active compensating of the most intense harmonics of the magnetic field in the air gap

**Key words:** magnetic vibration, vibration magnetic force, active damping, induction motor.

### References

- [1] N.V. Astakhov, “Matematicheskoe modelirovanie vibracij asinhronnyh mashin” [Mathematical modeling of vibrations of asynchronous machines] / N.V. Astakhov, V.S. Malyshev, N. Ya. Ovcharenko. - Chisinau: Shtiintsa, 1987. 145 p. (In Russian)
- [2] N.S. Dobroskok, “Algoritmicheskie metody snizheniya shumov i vibracij v chastot-no-reguliruemom asinhronnom elektroprivode” [Algorithmic methods of noise and vibration reduction in a frequency-controlled asynchronous electric drive]: PhD diss. SPb., 2014. 162 p. (In Russian)
- [3] K.C. Maliti, Modeling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation / K. C. Maliti. - Stockholm., 2000. 209 p.
- [4] I.G. Shubov, “Shum i vibraciya elektricheskikh mashin” [Noise and vibration of electrical machines] / I.G. Shubov. - L.: Energoatomizdat, 1986. 208 p. (In Russian)
- [5] N.V. Astakhov, “Magnitnye vibracii asinhronnyh elektrodvigatelye” [Magnetic vibrations of induction electric motors] / N.V. Astakhov, V.S. Malyshev, N.Y. Ovcharenko. - Chisinau: Shtiintsa, 1985. 123 p. (In Russian)
- [6] Belkhat, D. Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics / D. Belkhat, D. Roger, J. F. Brudny // Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference on. - 1997. - Sep.
- [7] Cassoret B. Magnetic noise reduction of induction machines / B. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J.-F. Brudny // Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:18, Issue:2). - 2003. - P. 570-579.
- [8] Franck D. Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors / D. Franck, M. van der Giet, K. Hameyer // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International. - 2011. - P. 1213-1218.
- [9] I.P. Kopylov, “Elektricheskie mashiny: Uchebnik dlya vuzov” [Electric machines] / I.P. Kopylov. - M.: Energoatomizdat, 1986. 360 p. (In Russian)
- [10] Shahaj, A. Mitigation of vibration in large electrical machines: doctoral dissertation / A. Shahaj. - Nottingham, 2010. -- 424 p.
- [11] L.K. Volkov “Vibraciya i shum elektricheskikh mashin maloj moshchnosti” [Vibration and noise of low power electric machines] / L.K. Volkov, R.N. Kovalev, G.N. Nikiforova et. al. - L.: Energiya, 1979. - 206 p. (In Russian)
- [12] Tinghsu S. Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform / S. Tinghsu, S. Hattori, M. Ishida, T. Hori // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2002. - V. 38, I. 5. - P. 1316 – 1325.

**В.А. Лавриненко, Д.В. Николаев**

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С КОНДЕНСАТОРНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

**Аннотация:** Приведены особенности работы, характеристики, расчётные осциллограммы электромагнитного момента и тока в режиме пуска электропривода центробежного насоса с конденсаторным асинхронным двигателем.

**Ключевые слова:** электропривод, центробежный насос, пуск.

Согласно отчёту Европейской комиссии [1], насосные системы потребляют почти 22 % всей электроэнергии, вырабатываемой во всем мире. Следовательно, актуальной является задача разработки энергоэффективных электроприводов насосных агрегатов. Улучшение энергоэффективности электропривода насосного агрегата может быть обеспечена за счёт правильного выбора элементов электропривода, его нагрузки и гидравлической сети [4].

Электроприводы насосных агрегатов получили широкое распространение во всех отраслях промышленности. В частности, маломощные электроприводы насосов широко применяются для подачи воды в посудомоечных машинах.

Целью статьи является ознакомление с результатами разработки авторами статьи механической части энергосберегающего электропривода насоса с конденсаторным асинхронным двигателем. К особенностям электропривода центробежного насоса можно отнести относительно простую конструкцию, отсутствие электрического преобразователя, частые прямые пуски от однофазной сети переменного тока, отсутствие регулирования скорости вращения, невысокую цену и работу в условиях повышенных значений температуры и влажности. Структурная схема электропривода приведена на рисунке 1. В задачу микроконтроллера входит формирование команд пуска и останова для режимов мойки и ополаскивания [7]. На режимы работы электропривода и его к.п.д. влияют колебания напряжения сети, температура и влажность окружающей среды, загрязнение насоса остатками смываемой пищи [1].

Одним из вариантов оптимизации режима работы является максимизация коэффициента полезного действия насосного агрегата. Режим работы с максимальным к.п.д. является оптимальным для насосного агрегата. Предпочтительным рабочим диапазоном считается диапазон  $\pm 20\%$  оптимального значения подачи. Допустимым рабочим диапазоном является диапазон значений подач жидкости от плюс 30 до минус 125 % оптимального значения подачи.

Эксплуатация вне пределов допустимого рабочего диапазона, определённого производителем насоса, является недопустимой.



Рис. 1. Структурная схема электропривода

Затраты энергии определяются значениями подачи перекачиваемой жидкости, необходимой высотой подъёма жидкости и параметрами насосного оборудования и трубопровода.

Мощность электродвигателя для привода при прямом соединении вала с рабочим колесом выбирается по максимальной мощности насоса

$$P_2 = k\rho Q_{max} H_{Q_{max}} / (367000 \eta_{Q_{max}}), \tag{1}$$

где  $P_2$  - мощность на валу электродвигателя, кВт;  $Q_{max}$  - максимально возможная объемная подача насоса, м<sup>3</sup>/ч;  $H_{Q_{max}}$  - напор, м;  $\eta_{Q_{max}}$  - к.п.д. насоса при  $Q_{max}$ ;  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  - коэффициент запаса, выбираемый в зависимости от условий работы агрегата. По ГОСТ 12878-67 рекомендуется значение коэффициента запаса  $k=1,25$  для насосов с мощностью до 20 кВт.

По полученному значению максимальной мощности  $P_2$  выбирается ближайший по каталогу тип электродвигателя. Номинальная мощность двигателя должна быть больше расчётной мощности  $P_2$ .

После выбора электродвигателя необходимо проверить соответствие его пусковых характеристик условиям работы агрегата в системе. Момент сопротивления насосного агрегата включает в себя момент трения вращающихся частей и момент, затрачиваемый на ускорение массы жидкости в трубопроводе.

К.п.д. насосного агрегата

$$\eta_{нагр.} = 9,81 \cdot \rho_u \cdot Q_u \cdot H_u / P_{нагр.}, \tag{2}$$

где  $\eta_{нагр.}$  - к.п.д. насосного агрегата, %; 9,81 - значение ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_u$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_u$  - объёмная подача воды

электронасосом,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H_u$  - напор, м;  $P_{\text{агр}}$  - мощность, потребляемая насосным агрегатом из электрической сети, Вт.

Были проведены экспериментальные исследования гидромеханических параметров центробежного насоса, позволившие выявить, что импортный аналог разрабатываемого насоса работал с к.п.д. 17 % и с подачей 90 л/мин, значения которых находятся за пределами допустимого рабочего диапазона. На рис. 3 режим работы импортного аналога насоса соответствует напору  $H=9$  м и подаче  $Q=90$  л/мин.

При разработке нового насоса была решена задача увеличения к.п.д. с 17 до 29 % за счёт проектирования авторами статьи нового рабочего колеса с увеличенным количеством лопастей и оптимальными углами  $\beta$  в соответствии с рис. 2. Режим работы нового насоса переместился в допустимый рабочий диапазон ближе к предпочтительному рабочему диапазону. Подача воды увеличилась до 188 л/мин или в 2,09 раза.

Оптимальный режим работы соответствует максимальному к.п.д. Дальнейшее увеличение нагрузки электродвигателя с целью перемещения рабочей точки насоса в область оптимального режима оказалось невозможным вследствие чрезмерного нагрева насоса в условиях повышенных значений температуры перекачиваемой воды и влажности воздуха.

Прямой пуск электропривода от сети длится 1,1 с в соответствии с рис. 4. Пусковой ток превышает номинальный ток в 2,05 раза. Значения времени пуска и пускового тока являются близкими к соответствующим значениям итальянского аналога *L71.T150.2V*.

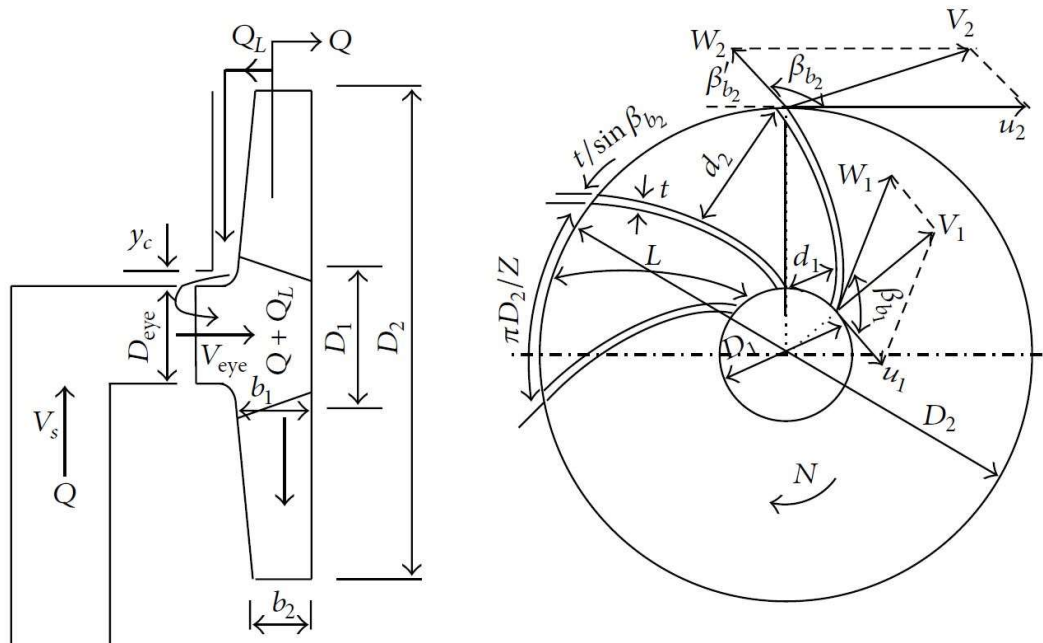
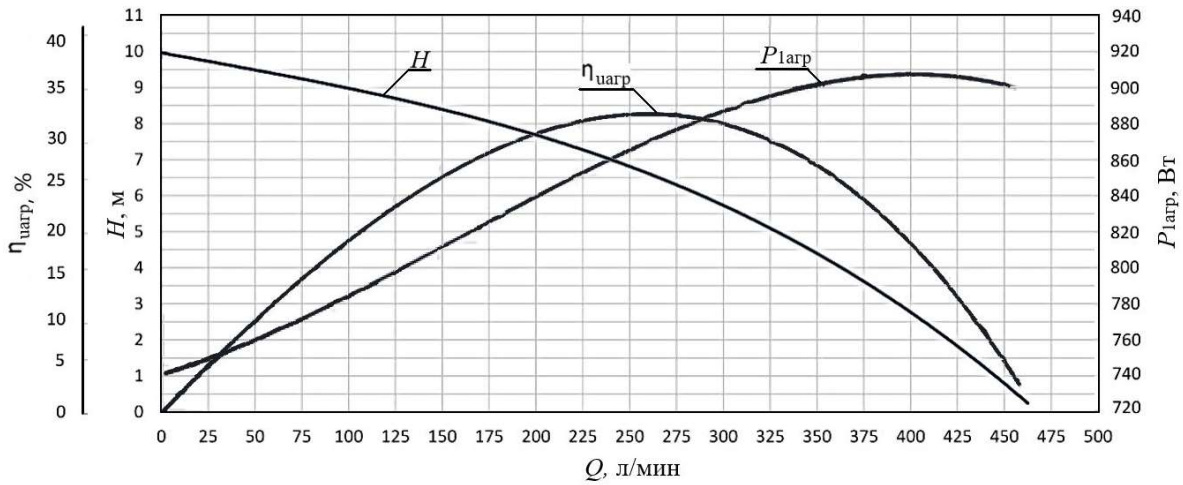


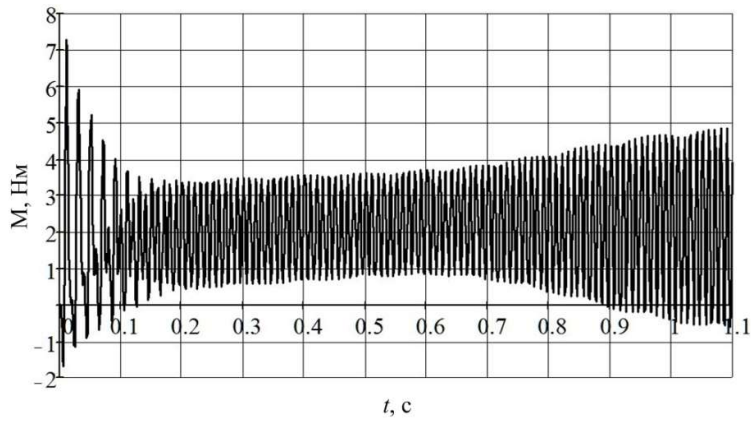
Рис. 2. Параметры рабочего колеса

Общий вид разработанного насосного агрегата представлен на рис. 5. Основные характеристики приведены в табл. 1.

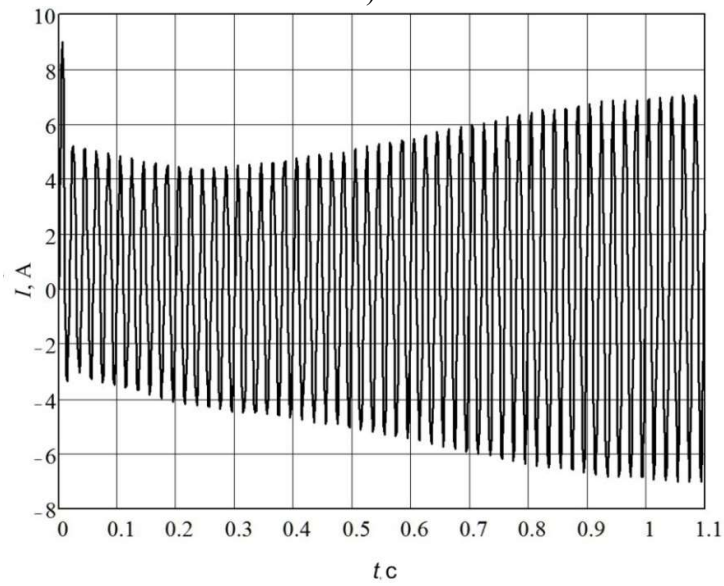




**Рис. 3. Зависимости величин от подачи  $Q$  для разработанного насоса:**  
 а) напора  $H$ ; б) к.п.д. агрегата  $\eta_{agr}$ ; в) потребляемой электрической мощности  $P_{agr}$ .



а)



б)

**Рис. 4. Расчётные осциллограммы электромагнитного момента (а) и тока (б)**

Таблица 1

## Технические характеристики насосных агрегатов

	Олимпия <i>L71.T150.2V</i> (Италия)	Разработанный насос (Россия)
Напряжение, В	238	238
Частота, Гц	50	50
Ток, А	3,1	3,3
Скорость вращения, об/мин	2835	2818
К.п.д., %	30	29
Масса, кг	7,5	6,8
Габариты (диаметр x длина), мм	176x314	179x275



Рис. 5. Общий вид разработанного насосного агрегата

**Выводы**

Применение в посудомоющих машинах разработанного авторами статьи нового насоса позволит улучшить качество мойки при одновременном сокращении времени работы насоса на 50 %. При этом уменьшится потребление электроприводом электроэнергии на 30%.

Библиографический список

1. European Commission. Study on Improving the Energy Efficiency of Pumps. 2001. Available online: <http://www.jakob-albertsen.dk/komposit/Darmstadtrapport.pdf> (accessed on 27 November 2019).
2. **Браславский, И.Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. - М.: Academia, 2004. 202 с.
3. **Лавриненко, В.А.** Пуск электропривода вентиляторной установки с конденсаторным асинхронным двигателем / В.А. Лавриненко // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – С.96-101.
4. Энергосбережение средствами электропривода: Докл. науч.-метод. семинара.- М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 80 с.
5. **Лавриненко В.А.** Анализ характеристик регулируемых асинхронных микродвигателей бытового назначения // Электротехника.1994. № 1. С. 15-18.
6. **Лавриненко В.А.** Тенденции развития электромеханических систем // Всерос. электротехн. конгресс ВЭЛК-99. Москва, 1999. Т.1. С. 155-157.
7. **Lavrinenko V.** Mathematical model of small induction motors with magnetic asymmetry // Proceedings of IPEMC'2000. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference / Tsinghua University, Beijing, China, August 15-18, 2000, vol. 3, pp. 1342-1346.
8. **Lavrinenko V.** Mathematical model of small induction machines / International XII Symposium on Micromachines and Servodrives // Kamien Slaski, Poland, 10...14, IX, 2000, vol. II, pp.428-435.
9. Electromechatronic system with small induction motor / Lavrinenko V., Danilov A., Kuzin N., Goncharov I. Proceedings of the Fifth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System // Technical University of Szczecin, Szczecin and Miedzyzdroje, Poland, September 5-8, 2001, vol. 3, pp. 929-932.
10. Theory and design of small motors / Lavrinenko V., Ilyenko G., Danilov A., Kuzin N., Goncharov I. // Sixth International Conference on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering Applied to Power Systems (AMTEE'2003). Pilsen, Czech Republic, 10-12 September 2003, pp. 34-37.
11. Исследование и разработка двухфазных асинхронных и трехфазных синхронных двигателей, выполненных на основе асинхронных двигателей серии 4А (отчет НИР): № гос. рег. 80013535 / Чуваш. ун-т.; Научн. рук-ль С.В.Покровский. Чебоксары, 1982.
12. Модернизация электродвигателей для стиральных машин (отчет НИР): № гос. рег. 01920012235 / Чуваш. ун-т; Е.И. Ефименко, В.А. Лавриненко, Ю.А. Михайлов и др. Чебоксары. 1992.
13. **Лавриненко В.А.** Разработка и проектирование однофазных асинхронных двигателей / В.А. Лавриненко, Р.А. Осипенко // Тр. молодых ученых и специалистов. Чуваш. ун-т. Чебоксары, 2001. С. 182-184.
14. **Петров А.П.** Исследование асинхронных конденсаторных двигателей с трехфазными обмотками. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1999. 20 с.

V.A. Lavrinenko, D.V. Nikolaev

## DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC DRIVE OF A CENTRIFUGAL PUMP WITH A CONDENSER ASYNCHRONOUS MOTOR

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov

**Abstract:** The features of operation, characteristics, calculated oscillograms of the electromagnetic torque and current in the starting mode of the electric drive of a centrifugal pump with a capacitor asynchronous motor are given.

**Key words:** electric drive, centrifugal pump, start-up.

### References

- [1] European Commission. Study on Improving the Energy Efficiency of Pumps. 2001. Available online: <http://www.jakob-albertsen.dk/komposit/Darmstadtrapport.pdf> (accessed on 27 November 2019).
- [2] I.Ya. Braslavsky, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Polyakov “Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod [Energy-saving asynchronous electric drive]”, Moscow: Academia, p. 202, 2004 (in Russian)
- [3] V.A. Lavrinenko “Pusk elektroprivoda ventilyatornoy ustanovki s kondensatornym asinkhronnym dvigatelem [Start-up of an electric drive of a fan unit with a capacitor asynchronous motor]”, *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki: sbornik statey [Actual problems of the electric power industry: a collection of articles]*, Nizhny Novgorod, p. 96-101, 2020 (in Russian)
- [4] V.A. Lavrinenko “Analiz kharakteristik reguliruyemykh asinkhronnykh mikrodvigatelay bytovogo naznacheniya [Analysis of characteristics of adjustable asynchronous micromotors for household use]”, *Electrical Engineering*, no. 1, p. 15-18, 1994 (in Russian)
- [5] V.A. Lavrinenko “Tendentsii razvitiya elektromekhanicheskikh system [Trends in the development of electromechanical systems]” All-Russian Electrotechnical Congress VELK-99 Moscow, p. 155-157, 1999
- [6] Lavrinenko V. Mathematical model of small induction motors with magnetic asymmetry // Proceedings of IPEMC'2000. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference / Tsinghua University, Beijing, China, August 15-18, 2000, vol. 3, pp. 1342-1346.
- [7] Lavrinenko V. Mathematical model of small induction machines / International XII Symposium on Micromachines and Servodrives // Kamien Slaski, Poland, 10...14, IX, 2000, vol. II, pp. 428-435.
- [8] Electromechatronic system with small induction motor / Lavrinenko V., Danilov A., Kuzin N., Goncharov I. Proceedings of the Fifth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System // Technical University of Szczecin, Szczecin and Miedzzydroje, Poland, September 5-8, 2001, vol. 3, pp. 929-932.
- [9] Theory and design of small motors / Lavrinenko V., Ilyenko G., Danilov A., Kuzin N., Goncharov I. // Sixth International Conference on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering Applied to Power Systems (AMTEE'2003). Pilsen, Czech Republic, 10-12 September 2003, pp. 34-37.
- [10] Research and development of two-phase asynchronous and three-phase synchronous motors based on asynchronous motors of the 4A series (research report): № state. reg. 80013535 / Chuvash. un-t.; Scientific hand-l S.V. Pokrovsky. Cheboksary, 1982.
- [11] E.I. Efimenko, V.A. Lavrinenko, Yu.A. Mikhailov Modernization of electric motors for washing machines (research report): № state. reg. 01920012235 / Chuvash. un-t, Cheboksary, 1992. (in Russian)

- [12] V.A. Lavrinenko, R.A. Osipenko “ Razrabotka i proyektirovaniye odnofaznykh asinkhronnykh dvigateley [Development and design of single-phase asynchronous motors]”, Cheboksary, p.182-184, 2001 (in Russian)
- [13] A.P. Petrov “Issledovaniye asinkhronnykh kondensatornykh dvigateley s trekhfaznymi obmotkami [Research of asynchronous capacitor motors with three-phase windings]”, Moscow: MEI, p. 20, 1999 (in Russian)

УДК 621.33

А. В. Серебряков<sup>1</sup>, А. С. Стеклов<sup>2</sup>, Д. М. Кочеганов<sup>1</sup>

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ РЕМОНТА СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>  
АО «ОКБМ Африкантов»<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье рассматривается подход к определению необходимости установки на различные типы судов систем прогнозирования и диагностирования технического состояния (ТС) судовых энергетических установок (СЭУ). Рассматриваются различные применяемые на практике критерии оценки сложности ремонта с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования.

**Ключевые слова:** автономная электроэнергетическая система, работоспособность, диагностика, техническое состояние.

### Введение

В России еще в первом десятилетии XX в. академиком А. Н. Крыловым была разработана научно обоснованная методика количественного оценивания качества, с помощью которой была решена задача выбора лучших проектов военных кораблей по совокупности их основных свойств. Существенный вклад в дальнейшее развитие методов оценки научно-технического уровня и качества внесла российская научная школа квалиметрии, в которой были определены ее общие методологические принципы, разработаны основы структуризации свойств, выбора и классификации показателей качества. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию существующих методов квалиметрической оценки приборов и разработке новых методов. В частности, предложены новые критерии эффективности (конструктивно-ценовой, габаритно-весовой, критерий комплексной устойчивости датчиков физических величин), которые удобно использовать при оценке приборов, о технических характеристиках которых нет достаточной информации. Однако описанные методы оценки качества основаны в значительной мере на использовании экспертиз, проведение которых для сотен, а иногда тысяч типов контрольно-измерительных приборов (только в России зарегистрировано свыше 4500 предприятий, имеющих права на производство и ремонт средств измерения) с постоянно меняющимися техническими характеристиками требует значительного времени и финансовых затрат, носит субъективный характер, и поэтому, чаще всего, не находит практического применения. В 20 и 30-е гг. прошлого столетия были предложены аналитические (неэкспертные) методики оценки качества, преимуществами которых является малая трудоемкость, большая надежность итоговых результатов, а недостатками — относительная технологическая сложность разработки критериев и методик

оценивания качества. Упростить процесс оценки качества приборов можно на основе методов теории подобия и анализа размерностей, которые используются для определения вида формул, выражающих зависимость между физическими величинами в изучаемых явлениях. Особенностью теории подобия и анализа размерностей является то, что они позволяют осуществлять замещение множества отдельных параметров совокупностью критериев, тем самым достигается увеличение степени общности полученного результата без потери содержащейся в ней информации [1,2].

Заметим, что теория подобия и анализ размерностей широко используются не только при исследовании газодинамики, теплообмена, но и при решении задач, связанных с прогнозированием ресурса работы механизма и его элементов, их безотказности, долговечности и безопасности, для анализа вибраций, определения технического уровня и качества судов, дизельных и газотурбинных двигателей. В основе данного метода лежит  $\pi$ -теорема, которая даёт возможность определить количество критериев подобия, характеризующих конкретное явление и сводится к составлению и решению уравнений размерностей. Общий алгоритм получения критериев подобия методом анализа размерностей состоит из пяти пунктов [3-6]:

- 1) выявление всех характеризующих данное явление параметров;
- 2) составление матрицы размерностей параметров;
- 3) выявление числа независимых между собой параметров;
- 4) нахождение комбинаций независимых между собой параметров и установление их числа;
- 5) определение количества выражений критериев подобия во всех формах записи.

### **Критерий сложности ремонта**

При выполнении оценки состояния и качества судовых установок проводится ранжирование ее составных элементов в зависимости от того, насколько сложным может оказаться ремонт.

Результат этого может состоять в получении рейтингов, которые оказываются представлены как ряд чисел. В итоге, проводится реальная оценка проявления того или иного качества всей системы или ее отдельных составных частей [7,8].

Автономный объект имеет множество различных параметров. Для проведения обобщения предположим, что набор из используемых на практике характеристик является необходимым и достаточным для оценки сложности ремонта рассматриваемого объекта. Необходимо учитывать и то, что каждая из характеристик сама по себе может оказаться разбитой на несколько критериев, расцениваемых отдельно. В качестве примера предлагается рассмотреть речное судно типа «паром» и морское судно типа «танкер».

Речной паром обычно используют на малых расстояниях, то есть менее 1 км, с его помощью переправляют различные виды грузов из пункта отправки в пункт назначения. Экипаж состоит не более чем из восьми человек. При этом один человек является электромонтером.

Морские танкеры применяются на больших расстояниях. Экипаж танкеров составляет более 50 человек, при этом в экипаже находится главный инженер-энергетик и до 10 человек, которые способны обслуживать судовую энергетическую установку (СЭУ).

Судовую энергетическую установку обоих типов судов на практике оценивают по таким критериям [9-11]:

- возможность отключения – возможность вывести из работы тот или иной элемент системы;
- доступность – возможность беспрепятственного физического доступа к элементу системы квалифицированным персоналом;
- ремонтпригодность – наличие возможности и необходимых средств для выявления возможных причин отказов и последующего проведения ремонта;
- кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу основных элементов устройства;
- сложность конструкции – особенности конструкции, препятствующие проведению ремонта в условиях похода – присутствие неразборных элементов и т. п.

Используя эти критерии, можно предложить оценку элементов СЭУ в баллах от 0 до 5.

Рассмотрим паром как объект оценки сложности выполнения ремонта по данным критериям. Результаты оценки представлены в табл.1.

Таблица 1

Критерии оценки сложности ремонта СЭУ на пароме

Элемент	Доступность (0 – недоступен, 5 – легко доступен)	Возможность отключения (0 – нереализуемо , 5 – легко реализуемо)	Сложность конструкци и (0 – высокая, 5 - низкая)	Кратность резервирова ния (0 – отсутствует , 5 – высокая степень)	Ремонто- пригоднос ть (0 – низкая степень, 5 – высокая степень)
ДВС	1	3	1	0	2
Синхронный генератор	1	3	1	0	0
ПЧ канала электродвижения	5	3	3	3	3
Датчик тока канала электродвижения	5	5	5	5	0
Электродвигатель	1	3	1	0	2
ПЧ канала сторонних потребителей	5	4	3	3	4
Датчик тока канала сторонних потребителей	5	5	5	5	0
Блок вычисления мощности нагрузки	5	4	1	4	5
Блок задания оптимальной частоты вращения вала ДВС	5	4	3	4	5
Сумматоры сигналов	5	4	4	4	4
Регулятор частоты вращения вала	5	4	3	4	4



Окончание табл. 1

Датчик частоты вращения вала ДВС	5	4	5	5	0
Задатчик амплитуды напряжения электродвигателя	4	4	3	3	4
Регулятор напряжения канала электродвижения	4	4	3	3	3
Датчик напряжения	5	5	5	5	0
Задатчик частоты вращения электродвигателя	5	4	3	4	3
Регулятор частоты вращения электродвигателя	5	4	4	3	4
Датчик частоты вращения гребного винта	5	3	5	4	0
Задатчик амплитуды напряжения потребителей	5	4	3	3	3
Регулятор напряжения канала потребителей	4	5	4	3	4
Датчик напряжения	5	5	5	5	0
Задатчик частоты напряжения канала потребителей	5	4	4	3	4

Рассмотрим морской танкер как объект оценки сложности выполнения ремонта по данным критериям. Результаты оценки представлены в табл.2.

Таблица 2

**Критерии оценки сложности ремонта СЭУ на танкере**

Элемент	Доступность (0 – недоступен, 5 – легко доступен)	Возможность отключения (0 – невозможно, 5 – легко реализуемо)	Сложность конструкции и (0 – высокая, 5 – низкая)	Кратность резервирования (0 – отсутствует, 5 – высокая степень)	Ремонто-пригодность (0 – низкая степень, 5 – высокая степень)
ДВС	0	1	1	0	1
Синхронный генератор	0	1	1	0	0
ПЧ канала электродвижения	2	1	3	0	3
Датчик тока канала электродвижения	2	5	5	4	0
Электрический двигатель	0	1	1	0	1
ПЧ канала сторонних потребителей	2	2	3	1	3
Датчик тока канала сторонних потребителей	4	5	5	4	0
Блок вычисления мощности нагрузки	3	3	1	1	5
Блок задания оптимальной частоты вращения вала ДВС	4	3	3	3	5
Сумматоры сигналов	3	3	4	3	3
Регулятор частоты вращения вала	4	3	3	3	4
Датчик частоты вращения вала ДВС	3	4	5	3	0
Задатчик амплитуды напряжения электрического двигателя	4	4	3	4	4

Окончание табл.2

Регулятор напряжения канала электродвижения	3	4	3	4	3
Датчик напряжения	4	5	5	5	0
Задатчик частоты вращения электрического двигателя	3	4	3	4	3
Регулятор частоты вращения электрического двигателя	4	4	4	3	4
Датчик частоты вращения гребного винта	2	3	5	4	0
Задатчик амплитуды напряжения потребителей	3	4	3	3	3
Регулятор напряжения канала потребителей	4	5	4	3	4
Датчик напряжения	4	5	5	5	0
Задатчик частоты напряжения канала потребителей	3	4	4	3	4

Для обобщения результатов сравнения двух типов судов найдем среднее арифметическое значение критериев оценки сложности ремонта для всех элементов СЭУ и представим данные в табл. 3.

Таблица 3

## Сравнение оценки сложности ремонта СЭУ

Элемент	Паром	Танкер
ДВС	1,4	0,6
Синхронный генератор	1	0,4
ПЧ канала электродвижения	3,4	1,8
Датчик тока канала электродвижения	4	3,2
Электрический двигатель	1,4	0,6
ПЧ канала сторонних потребителей	3,8	2,2
Датчик тока канала сторонних потребителей	4	3,6
Блок вычисления мощности нагрузки	3,8	2,6
Блок задания оптимальной частоты вращения вала ДВС	4,2	3,6
Сумматоры сигналов	4,2	3,2
Регулятор частоты вращения вала	4	3,4
Датчик частоты вращения вала ДВС	3,8	3
Задатчик амплитуды напряжения электродвигателя	3,6	3,8
Регулятор напряжения канала электродвижения	3,4	3,4
Датчик напряжения	4	3,8
Задатчик частоты вращения электрического двигателя	3,8	3,4
Регулятор частоты вращения электрического двигателя	4	3,8
Датчик частоты вращения гребного винта	3,4	2,8
Задатчик амплитуды напряжения потребителей	3,6	3,2
Регулятор напряжения канала потребителей	4	4
Датчик напряжения	4	3,8
Задатчик частоты напряжения канала потребителей	4	3,6

Для предотвращения поломки, возникшей неожиданным образом, требуется вовремя осуществлять диагностику технического состояния судна и судовых систем. От указанных ранее критериев зависит в результате периодичность такой диагностики. Диагностика технического состояния при этом может на

практике осуществляться на плановом техническом обслуживании. Однако есть типы судов, система диагностики технического состояния которых должна быть установлена непосредственно на самом судне. Периодичность диагностики технического состояния можно на практике оценить по 5-ти бальной шкале, где:

- 0 – систему диагностирования и прогнозирования устанавливают на судно для осуществления последующего регулярного отслеживания работоспособности СЭУ;
- 1 – систему диагностирования и прогнозирования устанавливают на судно, но диагностику осуществляют реже, например, раз в сутки;
- 2 – систему диагностирования и прогнозирования используют, если время похода более 15 дней;
- 3 – достаточно применять систему диагностирования по прибытии судна к месту базирования;
- 4 – достаточно осуществлять диагностику ТС 2 раза в течение года;
- 5 – система диагностики не требуется.

По данной шкале можно определить, нужно ли устанавливать систему диагностирования на рассматриваемые типы судов.

Для определения периодичности диагностики найдем среднее геометрическое значение оценок сложности ремонта элементов по табл. 3 для парома и танкера. Получены значения: танкер – 2,51; паром – 3,29.

Таким образом, на танкер предлагается установка системы прогнозирования и диагностирования СЭУ, с целью своевременного предотвращения неожиданных поломок и выходов из строя оборудования, для парома же целесообразно осуществлять диагностику технического состояния по прибытию судна к месту его базирования.

### Заключение

Были рассмотрены различные применяемые на практике критерии оценки сложности ремонта. Предложен подход к определению необходимости установки на различные типы судов систем прогнозирования и диагностирования технического состояния СЭУ. Преимуществом данного подхода является возможность его применения для различных типов судовых энергетических установок, а также уменьшение материальных затрат на устранение внезапных поломок оборудования и проведение диагностических мероприятий.

### Библиографический список

1. **Азгальдов, Г.Г.** Квалиметрия: первоначальные сведения. Справочное пособие с примером для АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов»: Учеб. пособие // М.: Высш. шк., 2010.
2. **Васенин, А.Б.** электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков, А.С. Плехов // Автоматизация в промышленности, 2012, №4. – С.36-38.
3. **Крюков, О.В.** Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков, А.В.

- 
- Серебряков // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 4 (29). С. 35-38.
4. **Лукьянов, С.И.** Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. №1(45). С. 129-134.
  5. **Серебряков, А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. -2013. -№ 3. - С.39-46.
  6. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов, А.В. Шахов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 203-209.
  7. V Thorsen and M Dalva: "Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry", Proc 8a IEE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge, No 444, pp 109-113.
  8. Thomson, W.T. and Fenger, M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. Industry Applications Magazine, IEEE. 7. 26 - 34. 10.1109/2943.930988, 2001.
  9. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей/А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 97-104.
  10. **Стеклов, А.С.** Нейронечёткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3. С. 39-43.
  11. **Стеклов, А.С.** Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей /А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник южно-уральского государственного университета. серия: энергетика. 2017. № 2. С. 82-88.

A. V. Serebryakov<sup>1</sup>, A. S. Steklov<sup>2</sup>, D. M. Kocheganov<sup>1</sup>

## CRITERIA FOR ASSESSING THE DIFFICULTY OF SHIP POWER MACHINERY REPAIRS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia <sup>1</sup>  
JSC "Afrikantov OKBM"  
Nizhny Novgorod, Russia <sup>2</sup>

**Abstract:** The article discusses an approach to determining the need to install on various types of systems for predicting and diagnosing the technical condition (TC) of ship power machinery (SPM). Various criteria used in practice for assessing the complexity of repairs are considered, taking into account external factors, such as operating conditions and equipment wear.

**Key words:** autonomous electric power system, operability, diagnostics, technical condition.

### References

- [1] Azgaldov, G.G. Qualimetry: initial information. Reference manual with an example for ANO "Agency for Strategic Initiatives to Promote New Projects": Textbook. allowance // M.: Higher. shk., 2010.
- [2] Vasenin, A.B., Kryukov, O.V., Serebryakov, A.V., Plekhov, A.S. Power supply systems based on SMART GRID principles for gas trunkline facilities // Automation in industry, 2012, no. 4 (29) - Pp.36-38.
- [3] Kryukov, O. V., Serebryakov, A. V. Method and decision-making system for predicting the technical state of electric-driven gas-pumping units // Electrotechnical systems and complexes. 2015. No. 4 (29). Pp. 35-38.
- [4] Lukyanov, S.I. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment / S.I. Lukyanov, A.S. Karandaev, A.S. Sarvarov et al. // Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov, 2014. No. 1 (45). Pp. 129-134.
- [5] Serebryakov, A.V. Optimization of diagnostics of the electromechanical part of wind power plants // Electrical equipment: operation and repair. -2013. -No. 3. -Pp.39-46.
- [6] Serebryakov, A.V., Titov, V.G., Chernov, E.A., Shakhov, A.V. Differentiation of load in power supply systems of autonomous consumers // Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva. 2015. No. 2 (109). Pp. 203-209.
- [7] V Thorsen and M Dalva: "Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry", Proc 8a IEE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge, No 444, pp 109-113.
- [8] Thomson, W.T. and Fenger, M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. Industry Applications Magazine, IEEE. 7. 26 - 34. 10.1109/2943.930988, 2001.
- [9] Steklov, A.S. Determination of the degree of performance of ship synchronous generators with the use of artificial neuro-fuzzy networks / A.S. Steklov, V.G. Titov, A.V. Serebryakov // Bulletin of the Chuvash University. 2016. No. 1. Pp. 97-104.
- [10] Steklov, A.S. Neuro-fuzzy modeling of the degree of operability of transformers of ship electric power plants // Electrotechnical systems and complexes. 2016. No. 3. Pp. 39-43.
- [11] Steklov, A.S. New algorithm for technical diagnostics of rowing electric motors / A.S. Steklov, V.G. Titov, A.V. Serebryakov // Bulletin of the South Ural State University. series: energy. 2017. No. 2. Pp. 82-88.

К.П. Слядзевская

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА СКОРОСТИ ПО КРИТЕРИЮ  
МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ «ШИП – ДПТ НВ»**

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена синтезу регулятора скорости по критерию минимального времени переходного процесса электропривода по схеме «широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения» методом полиномиальных уравнений. Оптимизация внутреннего контура тока произведена по критерию минимизации суммарной квадратичной ошибки с учетом внутренней обратной связи по ЭДС двигателя.

**Ключевые слова:** критерий минимального времени переходного процесса.

Применение микропроцессорной системы управления скорости ШИП – ДПТ НВ позволяет реализовать практически любые критерии настройки контуров регулирования для обеспечения заданных показателей качества. Поэтому разработка регулирования скорости, реализующего обработку скачка задания за минимальное время, является актуальной темой для исследования.

Математическая модель объекта регулирования контура скорости электропривода ШИП – ДПТ НВ при оптимизации контура тока на критерий минимизации суммарной квадратичной ошибки при скачке задания имеет вид [1, 2]

$$\mathbf{g}_{\omega} = \frac{p_{2\omega} \cdot z^2 + p_{1\omega} \cdot z}{p_{1y} \cdot (1-z)} \cdot \frac{k_{\omega}}{k_{iy}}, \quad (1)$$

где  $p_{1y} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{(z_1 - z_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2)}$ ;  $z = \exp(-p \cdot T_0)$ ;

$\lambda_1, \lambda_2$  - собственные числа матрицы ( $|\lambda \cdot E - A| = 0$ );

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & -\frac{c_e \cdot \Phi_H}{L_e} \\ \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} & 0 \end{bmatrix};$$

$z_1 = \exp(\lambda_1 \cdot T_0)$ ,  $z_2 = \exp(\lambda_2 \cdot T_0)$ ;

$$p_{1\omega} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} \cdot \frac{-\lambda_2 \cdot (1 - z_1) + \lambda_1 \cdot (1 - z_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2};$$

$$p_{2\omega} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} \cdot \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot z_1 \cdot z_2 + \lambda_2 \cdot z_2 - \lambda_1 \cdot z_1}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2};$$

$T_0$  - интервал дискретности  $T_0 = 0.008\text{с}$ ;

$$k = \frac{k_{\omega}}{k_{iy}};$$

где  $k_{iy}$  - коэффициент обратной связи по току якоря;

$k_{\omega}$  - коэффициент обратной связи по скорости.

Особенностью микропроцессорной системы автоматического регулирования (МПСАР) является постоянство управляющих сигналов  $u$  на интервале дискретности  $T_0$ .

Пусть желаемый процесс движения системы задан в виде правильной рациональной функции  $x = \frac{a}{b}$ , где  $a$  и  $b$  - заданные полиномы от  $z$ , причем порядок  $|a| < |b|$ . Будем искать управление  $u$  объектом, имеющим передаточную функцию  $g = \frac{p}{q}$ , где  $p$  и  $q$  - заданные полиномы от  $z$ . Обозначим через  $v = (b, q)$  наибольший делитель полиномов  $b$  и  $q$ . Введем полиномы  $b_0$  и  $q_0$  такие, что  $b = b_0 \cdot v$ ,  $q = q_0 \cdot v$ ,  $(b_0, q_0) = 1$ .

Для объекта контура скорости получаем  $v = 1 - z$ ,  $q_0^+ = p_{1y}$ ,  $q_0^- = 1$ ,  $q_0 = q_0^+ \cdot q_0^-$  - факторизация полинома несокращаемой части знаменателя (разбиение  $q_0$  на произведение двух полиномов, один из которых  $q_0^+$  не имеет корней внутри единичной окружности, а другой  $q_0^-$  - вне единичной окружности).

Оптимизация по критерию минимального времени переходного процесса позволяет получить переходный процесс скорости оптимальный по быстродействию.

Определим передаточную функцию регулятора в виде

$$w = \frac{q_0^+ \cdot \theta}{b_0 \cdot \pi}, \tag{2}$$

где  $\theta$  и  $\pi$  - полиномы, удовлетворяющие  $\pi$ -уравнению

$$p \cdot \theta + b \cdot q_0^- \cdot \pi = a. \tag{3}$$

Подставляя (2) и (3) в формулу, дающую изображение сигнала рассогласования в системе с обратной связью  $e = \frac{x}{1 + g \cdot w}$ , получим  $e = q_0^- \cdot \pi$ . Ему соответствует минимальное решение  $\pi$ -уравнения (3). Длительность кратчайшего переходного процесса

$$t_{\min} = (1 + |e|) \cdot T_0 = \left( |p| + |q_0^-| \right) \cdot T_0.$$

Изображение сигнала задания на ток якоря имеет

$$u = w \cdot e = \frac{q_0}{b_0} \cdot \theta^0. \quad (4)$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$h = \frac{p \cdot \theta^0}{a}. \quad (5)$$

Найдем сигнал управления объектом контура скорости (сигнал задания на ток якоря), обеспечивающий минимальное время переходного процесса, при

входном сигнале вида скачка  $\mathbf{x} = \frac{1}{1-z}$ .

В этом случае передаточная функция регулятора имеет вид [1]:

$$w_{\omega} = \frac{\frac{p_{1y}}{k \cdot p_{1\omega}}}{\left( 1 + \frac{p_{2\omega}}{p_{1\omega}} z \right)}, \quad (6)$$

а соответствующий алгоритм регулирования скорости

$$u_{zm}[n] = -\frac{p_{2\omega}}{p_{1\omega}} \cdot u_{zm}[n-1] + \frac{p_{1y}}{k \cdot p_{1\omega}} \cdot \delta\omega[n], \quad (7)$$

где  $\delta\omega = \omega_3 - k_{\omega} \cdot \omega$ .

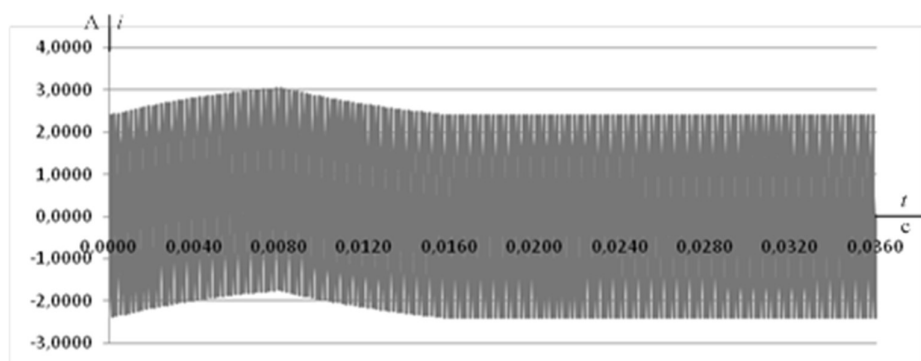
В пакете MATLAB была создана модель МПСАР ШИП–ДПТ НВ. Моделирование проводилось для двигателя 2ПН132МУХЛ4 мощностью 7 кВт при скачке сигнала задания  $\omega_3 = 0.1 \text{ с}^{-1}$ , симметричном способе управления ШИП (частота пилы 5 кГц), интервале дискретности 0.008 с и  $M_c = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Полученные переходные процессы представлены на рис. 1.

## Выводы

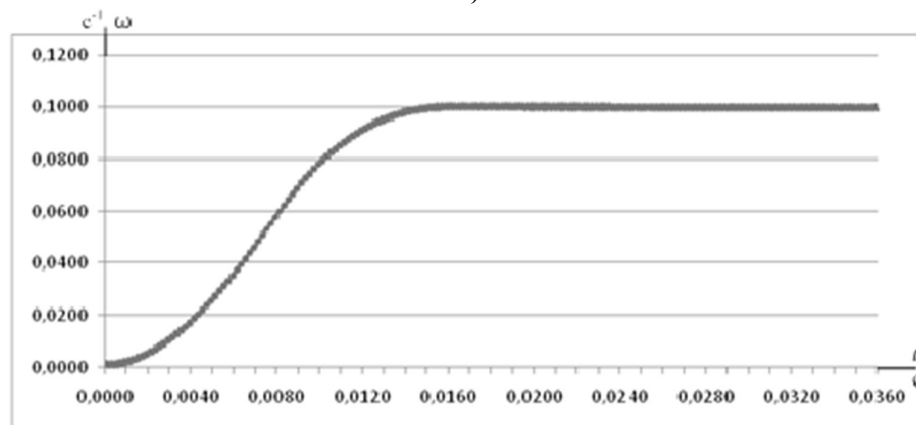
1. При оптимизации контура скорости МПСАР ШИП–ДПТ НВ на минимальное время переходного процесса отработка скачка задания происходит без перерегулирования за время 0.016 с (два интервала дискретности).

2. Алгоритм регулирования скорости, обеспечивающий минимальное время переходного процесса при скачке задания, имеет первый порядок.

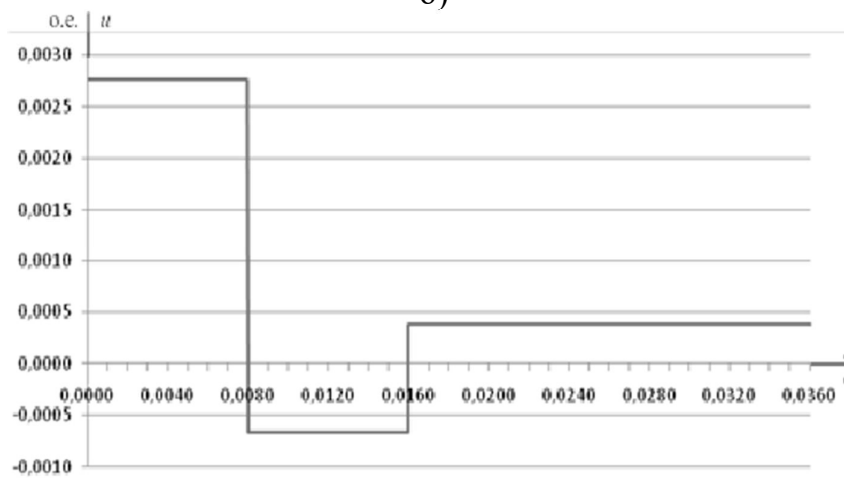




а)



б)



в)

**Рис. 1. Переходные процессы в контуре скорости МПСАР ШИП–ДПТ НВ при настройке на минимальное время переходного процесса при скачке задания: а – тока якоря в А от времени в с; б – скорости в с<sup>-1</sup> от времени в с; в – управляющего напряжения ШИП от времени в с**

### Библиографический список

1. **Слядзевская, К.П.** Математическое описание и синтез алгоритмов регулирования асинхронного частотного электропривода на основе теории импульсных систем. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»– Н. Новгород: НГТУ, 14 декабря 2001. –202 с.

- 
2. **Слядзевская, К.П.** Аperiodический регулятор состояния для электропривода ШИП–ДПТ НВ//Материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции, посвященной 100-летию плана ГОЭЛРО «Актуальные проблемы электроэнергетики» - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2020. – с. 114 - 118
  3. **Волгин, Л.Н.** Оптимальное дискретное управление динамическими системами/Под ред. П.Д. Крутько. –М.: Наука, 1986. – 240 с.

**K. P. Slyadzevskaya**

**OPTIMIZATION OF THE SPEED CONTOUR ACCORDING TO THE  
CRITERION MINIMUM TRANSITION TIME  
ELECTRIC DRIVE ACCORDING TO THE SCHEME «PULSE-WIDTH  
CONVERTER-DC MOTOR OF INDEPENDENT EXCITATION»**

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

**Abstract:** The article is devoted to the synthesis of a speed controller according to the criterion of the minimum transition time of an electric drive according to the scheme «pulse-width converter – DC motor of independent excitation» by the method of polynomial equations. The optimization of the internal current loop was performed according to the criterion of minimizing the total quadratic error, taking into account the internal feedback on the EMF of the motor.

**Keywords:** minimum transition time criterion.

**References**

- [1] K.P. Slyadzevskaya Matematicheskoe opisanie i sintez algoritmov regulirovaniya asinhronnogo chastotnogo elektroprivoda na osnove teorii impulsnyih system. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”– Nizhny Novgorod: NNSTU, 14 December 2001 (in Russian).
- [2] K.P. Slyadzevskaya “Aperiodicheskiy regulyator sostoyaniya dlya elektroprivoda SHIP–DPT NV”//Materials of the VI All-Russian (XXXIX Regional) Scientific and Technical Conference, dedicated to the 100th anniversary of the GOELRO plan “Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]”, 2020, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 114-118 (in Russian).
- [3] L.N. Volgin Optimal'noe diskretnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami/Pod red. P.D. Krut'ko. –M.: Nauka, 1986 (in Russian).

К.П. Слядзевская

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА ТОКА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНОЙ КВАДРАТИЧНОЙ ОШИБКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ «ШИП – ДПТ НВ»

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена синтезу регулятора тока по критерию минимизации суммарной квадратичной ошибки электропривода по схеме «широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения» методом полиномиальных уравнений. При синтезе регулятора тока учитывается внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя.

**Ключевые слова:** критерий минимизации суммарной квадратичной ошибки.

Электропривод по схеме «ШИП – ДПТ НВ» с микропроцессорной системой управления является одним из самых экономичных и обладает большим диапазоном регулирования скорости. Применение цифровых регуляторов позволяет улучшить показатели качества регулирования электропривода по сравнению с традиционными настройками на дискретные аналоги модульного и симметричного оптимумов. Поэтому разработка цифровых регуляторов для контуров регулирования электропривода ШИП – ДПТ НВ остается актуальной темой для исследования.

Математическая модель объекта регулирования контура тока ШИП – ДПТ НВ имеет вид [1, 2]

$$g_y = \frac{k_{iy} \cdot k_n \cdot p_{1y} \cdot z \cdot (1-z)}{1 + q_{1\omega} \cdot z + q_{2\omega} \cdot z^2}, \quad (1)$$

где  $p_{1y} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{(z_1 - z_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2)}$ ;  $z = \exp(-p \cdot T_0)$ ;

$\lambda_1, \lambda_2$  - собственные числа матрицы ( $|\lambda \cdot E - A| = 0$ );

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & -\frac{c_e \cdot \Phi_H}{L_e} \\ \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} & 0 \end{bmatrix};$$

$z_1 = \exp(\lambda_1 \cdot T_0)$ ,  $z_2 = \exp(\lambda_2 \cdot T_0)$ ;

$T_0$  - интервал дискретности  $T_0 = 0.008$ с;

$q_{1\omega} = -(z_1 + z_2)$ ;  $q_{2\omega} = z_1 \cdot z_2$ ;

$k_{iy}$  - коэффициент обратной связи по току якоря;

$k_n$  - коэффициент усиления преобразователя.

Особенностью микропроцессорной системы автоматического регулирования (МПСАР) является постоянство управляющих сигналов  $u$  на интервале дискретности  $T_0$ .

Пусть желаемый процесс движения системы задан в виде правильной рациональной функции  $x = \frac{a}{b}$ , где  $a$  и  $b$  - заданные полиномы от  $z$ , причем порядок  $|a| < |b|$ . Будем искать управление  $u$  объектом, имеющим передаточную функцию  $g = \frac{p}{q}$ , где  $p$  и  $q$  - заданные полиномы от  $z$ . Обозначим через  $\nu = (b, q)$  наибольший делитель полиномов  $b$  и  $q$ . Введем полиномы  $b_0$  и  $q_0$  такие, что  $b = b_0 \cdot \nu$ ,  $q = q_0 \cdot \nu$ ,  $(b_0, q_0) = 1$ .

Суммарной квадратичной ошибкой называется показатель

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} e_i^2,$$

где  $e_i$  - текущее значение ошибки системы. Процесс ликвидации ошибки  $\{e_i\}$  считается устойчивым, если  $e_i \rightarrow 0$  при  $i \rightarrow \infty$ , а показатель суммарной квадратичной ошибки принимает конечное значение.

Оптимизация по критерию минимизации суммарной квадратичной ошибки позволяет получить переходный процесс тока якоря, совпадающий в тактовые моменты времени с задающим сигналом. Однако между тактами квантования могут возникнуть слабо демпфированные скрытые колебания регулируемой координаты.

Передаточную функцию регулятора найдем в виде [3]

$$w = \frac{q_0^+ \cdot \theta}{b_0 \cdot p^+ \cdot \pi}, \tag{2}$$

где  $q_0 = q_0^+ \cdot q_0^-$  - факторизация полинома несокращаемой части знаменателя (разбиение  $q_0$  на произведение двух полиномов, один из которых  $q_0^+$  не имеет корней внутри единичной окружности, а другой  $q_0^-$  - вне единичной окружности);

$p = p^+ \cdot p^-$  - факторизация числителя передаточной функции объекта регулирования;

$\theta$  и  $\pi$  - полиномы, удовлетворяющие  $\pi$ -уравнению

$$p^- \cdot \theta + b \cdot q_0^- \cdot \pi = a^+ \cdot \tilde{a}^- \cdot \tilde{p}^- \cdot \tilde{q}_0^-. \tag{3}$$

Обозначим полином с обратным порядком следования коэффициентов как

$$\tilde{a}(z) = \sum_{i=0}^n a_{n-i} \cdot z^i.$$

Процесс установления ошибки

$$e = \frac{\tilde{a}^- \cdot \tilde{q}_0^- \cdot \pi}{\tilde{a}^- \cdot \tilde{p}^- \cdot \tilde{q}_0^-} \quad (4)$$

является устойчивым, хотя имеет бесконечную длительность.

Вычислим сигнал управления

$$u = w \cdot e = \frac{\tilde{a}^- \cdot \tilde{q}_0^- \cdot \theta}{\tilde{a}^- \cdot \tilde{b}_0 \cdot \tilde{p}^* \cdot \tilde{q}_0^-}, \quad (5)$$

где  $\tilde{p}^* = \tilde{p}^+ \cdot \tilde{p}^-$ .

Передаточная функция замкнутого контура

$$h = \frac{\tilde{p}^- \cdot \theta}{\tilde{a}^+ \cdot \tilde{a}^- \cdot \tilde{p}^- \cdot \tilde{q}_0^-}. \quad (6)$$

Найдем сигнал управления объектом контура тока якоря, обеспечивающий минимум суммарной квадратичной ошибки, при входном сигнале вида

скачка  $\mathbf{x} = \frac{1}{1-z}$ .

В этом случае передаточная функция регулятора имеет вид [1]:

$$w_y = \frac{1 + q_{1\omega} \cdot z + q_{2\omega} \cdot z^2}{(1-z)^2 \cdot k_{iy} \cdot k_n \cdot p_{1y}}, \quad (6)$$

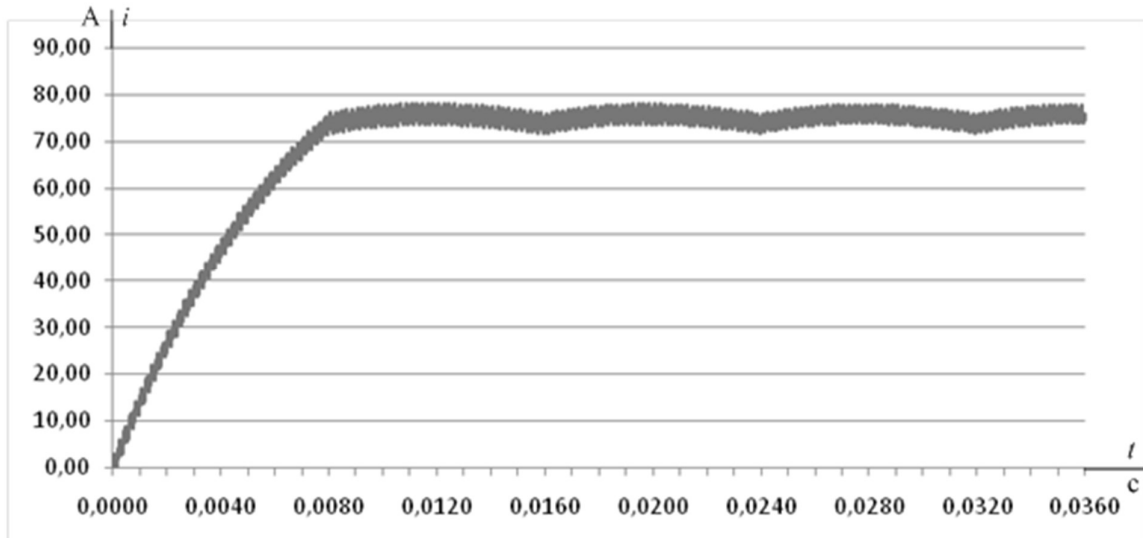
а соответствующий алгоритм регулирования тока якоря

$$u[n] = 2 \cdot u[n-1] - u[n-2] + \frac{1}{k_{iy} \cdot k_n \cdot p_{1y}} \cdot \delta i[n] + \frac{q_{1\omega}}{k_{iy} \cdot k_n \cdot p_{1y}} \cdot \delta i[n-1] + \frac{q_{2\omega}}{k_{iy} \cdot k_n \cdot p_{1y}} \cdot \delta i[n-2], \quad (7)$$

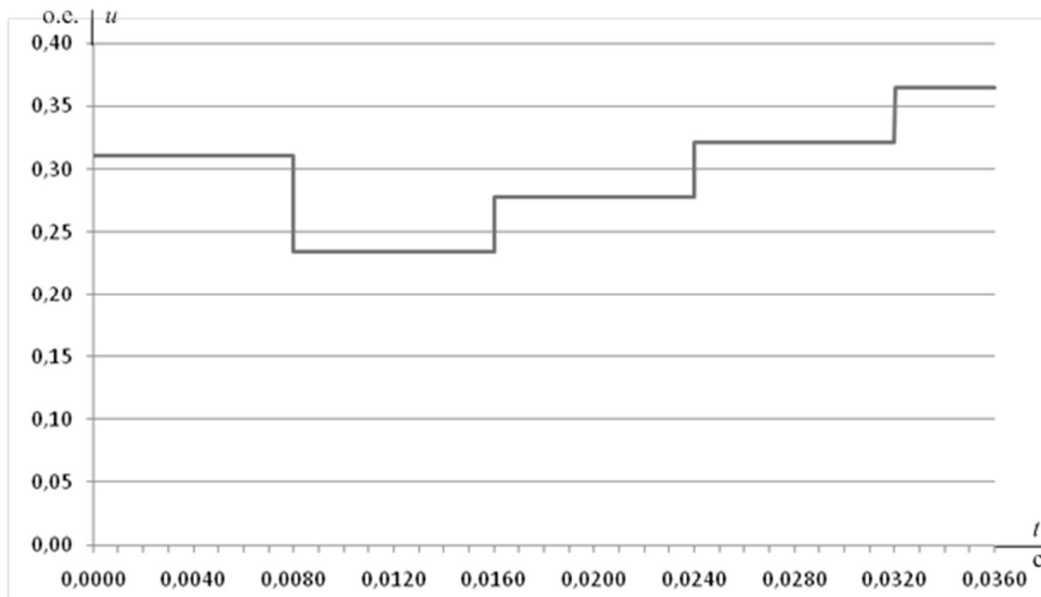
где  $\delta i = u_{zm} - k_{iy} \cdot i$ .

В пакете MATLAB была создана модель контура тока якоря МПСАР

ШИП–ДПТ НВ. Моделирование проводилось для двигателя 2ПН132МУХЛ4 мощностью 7 кВт при скачке сигнала задания  $u_{зм} = 1В$ , симметричном способе управления ШИП (частота пилы 5 кГц), интервале дискретности 0.008 с и  $M_c = 0 Н·м$ . Полученные переходные процессы представлены на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Переходные процессы в контуре тока якоря МПСАР ШИП–ДПТ НВ при настройке на минимум суммарной квадратичной ошибки: а – тока якоря в А от времени в с; б – управляющего напряжения ШИП от времени в с

### Выводы

1. Время переходного процесса в замкнутом контуре тока МПСАР ШИП–ДПТ НВ при его оптимизации на критерий минимизации суммарной

квадратичной ошибки составляет 0.008 с (один интервала дискретности). Обработка скачка сигнала задания на ток происходит без перерегулирования.

2. Алгоритм регулирования тока, обеспечивающий минимум суммарной квадратичной ошибки, имеет второй порядок.

3. Пульсации в сигнале тока объясняются симметричным способом управления транзисторами ШИП.

#### Библиографический список

4. **Слядзевская, К.П.** Математическое описание и синтез алгоритмов регулирования асинхронного частотного электропривода на основе теории импульсных систем. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» – Н. Новгород: НГТУ, 14 декабря 2001. – 202 с.
5. **Слядзевская, К.П.** Аperiodический регулятор состояния для электропривода ШИП–ДПТ НВ//Материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции, посвященной 100-летию плана ГОЭЛРО «Актуальные проблемы электроэнергетики»: / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – с. 114 - 118
6. **Волгин, Л.Н.** Оптимальное дискретное управление динамическими системами/Под ред. П.Д. Крутько. –М.: Наука, 1986. – 240 с.



**K. P. Slyadzevskaya**

**OPTIMIZATION OF THE CURRENT LOOP ACCORDING TO THE  
CRITERION MINIMIZING THE TOTAL QUADRATIC ERROR  
ELECTRIC DRIVE ACCORDING TO THE SCHEME  
«PULSE-WIDTH CONVERTER-DC MOTOR OF INDEPENDENT  
EXCITATION»**

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

**Abstract:** The article is devoted to the synthesis of a current regulator according to the criterion of minimizing the total quadratic error of an electric drive according to the scheme «pulse-width converter – DC motor of independent excitation» by the method of polynomial equations. When synthesizing the current regulator, the internal feedback on the EMF of the motor is taken into account.

**Keywords:** the criterion of minimizing the total square-law error.

**References**

- [1] K.P. Slyadzevskaya Matematicheskoe opisanie i sintez algoritmov regulirovaniya asinhronnogo chastotnogo elektroprivoda na osnove teorii impulsnyih system. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems” – Nizhny Novgorod: NNSTU, 14 December 2001 (in Russian).
- [2] K.P. Slyadzevskaya “Aperiodicheskiy regulyator sostoyaniya dlya elektroprivoda SHIP–DPT NV”//Materials of the VI All-Russian (XXXIX Regional) Scientific and Technical Conference, dedicated to the 100th anniversary of the GOELRO plan “Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]”, 2020, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 114-118 (in Russian).
- [3] L.N. Volgin Optimal'noe diskretnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami/Pod red. P.D. Krut'ko. –M.: Nauka, 1986 (in Russian).

А.Ю. Смирнов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Александрова<sup>1</sup>, Д.А. Кудряшов<sup>1,2</sup>

## МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПРИВОДА В РЕЖИМЕ ОПУСКАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>

АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье описывается электропривод вертикального перемещения регулирующего органа, скорость которого ограничивается посредством электромеханического преобразователя энергии синхронного типа, переводимого в генераторный режим после обесточивания обмотки.

Характеристики преобразователя, обеспечивающего формирование подходящего закона изменения скорости регулирующего органа, могут быть получены в результате обработки экспериментальных данных, или расчётом, с использованием результатов расчёта на сеточной модели. Для обработки экспериментальных данных используется математический аппарат теории планирования эксперимента, который позволяет учесть температурную зависимость потока постоянных магнитов генератора.

**Ключевые слова:** электропривод, синхронная машина, регулирующий орган, планирование эксперимента, метод конечных элементов.

Для регулирования, поддержания мощности и аварийной защиты ядерных энергетических установок применяют электроприводы вертикального перемещения регулирующих органов внутри активной зоны реактора [1-3]. Различают три основных режима электромеханического преобразования энергии в исполнительных механизмах вертикального перемещения:

- 1) фиксированная стоянка под током - удержание регулирующего органа (РО) в статическом режиме;
- 2) двигательный режим (подъем и опускание РО);
- 3) режим обесточивания (аварийное опускание РО под действием собственного веса).

В последнем режиме скорость движения РО под действием собственного веса ограничивается переключением электромеханического преобразователя из двигательного режима в генераторный режим, или использованием отдельного устройства.

**Допущения.** Полагаем, что в этом режиме электромагнитные процессы в двигателе после его обесточивания завершаются до начала электромеханического процесса движения РО в сторону его опускания.

Также, полагаем, что все возмущения на частоте опускания РО поглощаются приводом, и он движется без колебаний вокруг синхронной частоты, определяемой мгновенным значением частоты вращения генератора.

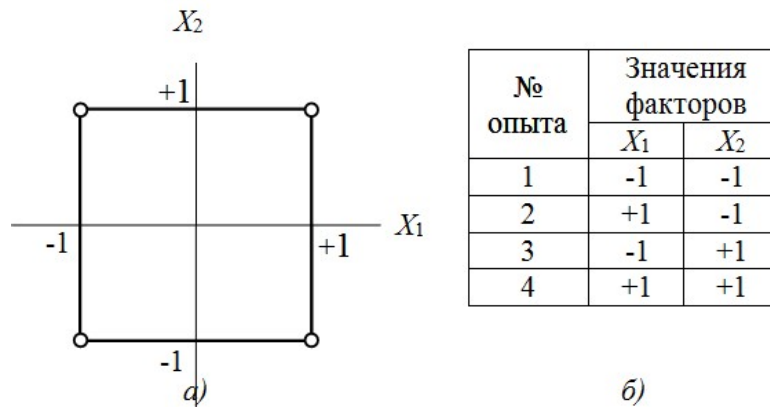
Тогда математическая модель электропривода в режиме опускания РО под действием собственного веса будет представлена единственным уравнением движения, записанным в виде баланса составляющих момента и углового ускорения  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + M(\dot{\theta}) + M_2 \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = 0. \tag{1}$$

Здесь  $J$  – момент инерции привода, приведённый к валу обесточенной машины,  $M_1$  – приведённый момент от веса РО,  $M_2$  – момент от действия сил трения в механизме.

Характеристикой машины,  $M(\dot{\theta})$  работающей в режиме ограничения опускания РО, является генераторная. Она представляет собой зависимость электромагнитного момента от угловой скорости  $\dot{\theta}$  принудительного вращения ротора внешним механизмом через вал. Устройства, предназначенные для работы в генераторном режиме, представляют собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов. Для стабилизации поля возбуждения к обмотке якоря подключены конденсаторы [4]. Характеристика представляет собой кривую, нелинейно возрастающую до некоторого максимального значения, определяемого частотой резонанса напряжений в цепи якоря и ёмкостной нагрузки, после чего переходит на неустойчивый участок падения момента с ростом скорости опускания РО.

Эта характеристика требует серьёзного расчёта, так как помимо частоты вращения она является функцией температуры и ёмкости подключенных конденсаторов. Однако, если известны экспериментальные результаты, то задача может быть упрощена путём обработки данных до получения универсальных зависимостей.



**Рис. 1. План эксперимента ПФЭ 2<sup>2</sup> и таблица варьируемых факторов**

В качестве математического аппарата, посредством которого эти зависимости могут быть получены, удобно использовать математический аппарат теории планирования эксперимента [5]. Метод позволяет перейти от подробных, но

громоздких для использования моделей, которые имеют простую аналитическую форму и потому удобны в использовании.

Простейший план эксперимента включает в себя все возможные сочетания минимального и максимального значений каждого фактора. Все они образуют  $n$ -мерное факторное пространство. При  $n=2$  оно представляет собой квадрат с вершинами в точках  $-1-1$ ,  $-1+1$ ,  $+1-1$ ,  $+1+1$  (рис. 1, а).

Значение  $-1$  соответствует минимальному значению варьируемого фактора,  $X_1$  или  $X_2$ , а  $+1$  – максимальному значению варьируемого фактора.

Совокупность этих значений составляет факторное пространство. Для него заполняется таблица (рис. 1, б). План проведения экспериментов в соответствии с этой таблицей в теории планирования эксперимента обозначается как ПФЭ (полный факторный эксперимент) типа  $2^2$ .

Трёхфакторное пространство,  $n=3$ , представляет собой куб с координатами  $\pm 1$  в его вершинах (рис. 2).

Полный факторный эксперимент в трёхмерном факторном пространстве обозначается как ПФЭ  $2^3$ . Объём опытов для него представлен в таблице (рис. 2, б).

В общем случае виртуального  $n$ -мерного факторного пространства для полного факторного эксперимента требуется провести  $2^n$  опытов.

Рассмотрим задачу определения электромагнитного момента магнитоэлектрического генератора с ротором, который работает на ёмкостную нагрузку.

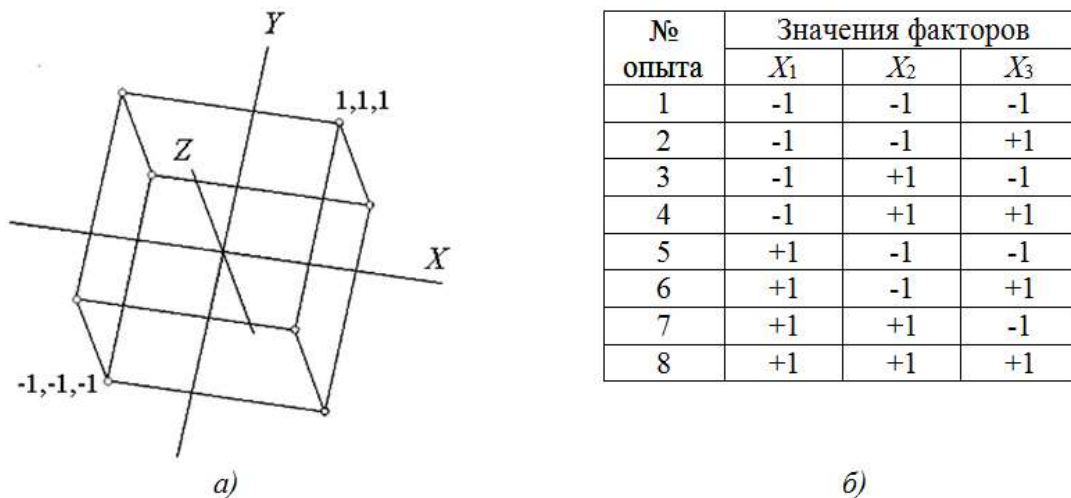


Рис. 2. Трёхмерное факторное пространство (а) и план эксперимента ПФЭ  $2^3$  (б)

Учесть уменьшение генераторного момента под влиянием температуры можно посредством введения коэффициента теплового влияния:

$$K_{ТВ} = \frac{P_{гор}}{P_{хол}} = \frac{M_{э\_гор}}{M_{э\_хол}}, \quad (2)$$

где  $P_{гор}$ ,  $M_{Эгор}$ ,  $P_{хол}$ ,  $M_{Эхол}$  - мощность и электромагнитный момент, развиваемые в генераторном режиме горячим и холодным двигателем соответственно, при каждом конкретном значении ёмкости нагрузочных конденсаторов и скорости вращения ротора.

Для того, чтобы по точкам  $K_{ТВ}$  найти всю функцию этого коэффициента, воспользуемся математическим аппаратом метода планирования эксперимента. Сначала зададимся пределами изменения переменных (факторов). Выбранные пределы приведены в табл. 1. Коэффициенты полинома  $a_1 \dots a_6$  вычисляются через кодированные значения факторов

$$a_i = \frac{\sum_{n=1}^N \tilde{x}_{in} K_{ТВ(n)}}{N}, \quad i=0, 1, \dots, 6, \tag{3}$$

где  $\tilde{x}$  – кодированные значения температуры, ёмкости или скорости вращения ротора двигателя ( $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  или  $\tilde{\Omega}$ ),  $N$  – число элементов матрицы полного факторного эксперимента. При трёхфакторном ортогональном плане первого порядка  $N=2^3=8$ ;  $K_{ТВ(n)}$  – значение коэффициента уменьшения генераторного момента в  $n$ -м опыте ( $n=1, 2, 3, \dots, N$ ).

Кодированные значения факторов  $\tilde{X}_i$  связаны с их истинными значениями  $X$  следующим образом:

$$\tilde{x} = \frac{2X - X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{4}$$

где  $X$  – символьное обозначение воздействующего фактора,  $T$ ,  $C$  или  $\Omega$ ;  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значение фактора по таблице, приведённой далее.

**Пределы изменения факторов коэффициента теплового влияния  $K_{ТВ}$**

Наименование параметра	Обозначение [ед.изм.]	Минимум	Максимум
Температура обмотки двигателя	$T$ [°C]	20	110
Ёмкость нагрузочных конденсаторов	$C$ [мкФ]	10	70
Частота вращения ротора двигателя	$\Omega$ [об/мин]	100	800

Экспериментальные значения коэффициента температурного влияния  $K_{ТВ}$  взяты из результатов испытаний двигателя в холодном и горячем состоянии, температура корпуса которого в процессе проведения испытаний достигала 110°C. Испытания проводились в соответствии с планом трёхмерного факторного эксперимента ПФЭ 2<sup>3</sup>, рис. 3 [5].

Полином функции коэффициента теплового влияния, найденный с использованием полученных экспериментальных результатов, в кодированных значениях факторов  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{\Omega}$ , имеет вид

$$K_{ТВ} = 0,861 - 0,139\tilde{T} - 0,049\tilde{C} - 0,043\tilde{\Omega} - 0,049\tilde{T}\tilde{C} - 0,043\tilde{T}\tilde{\Omega} + 0,022\tilde{C}\tilde{\Omega} \quad (5)$$

Переход к истинным значениям факторов  $T$ ,  $C$ ,  $\Omega$  от кодированных  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{\Omega}$  даёт следующий состав коэффициентов полинома:

$$K_{ТВ} = 1,0454 - 0,0005T - 0,00023C - 0,000006\Omega - 0,000036TC - \quad (6) \\ - 0,000002T\Omega + 0,000002C\Omega.$$

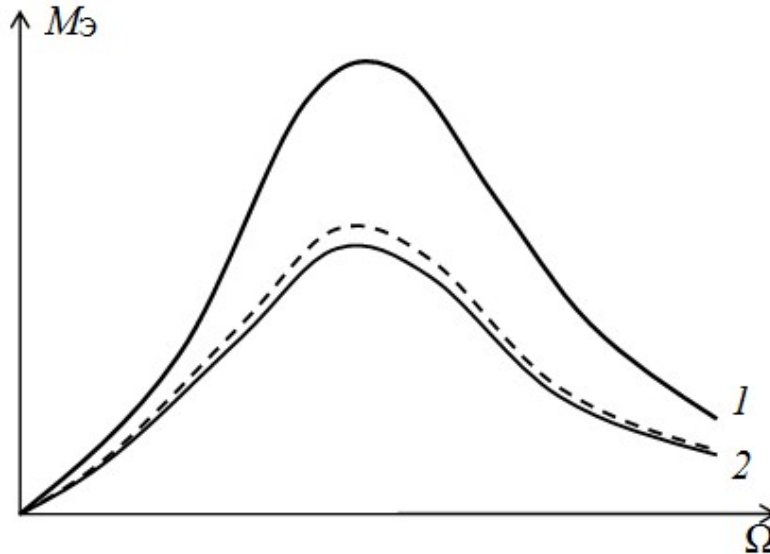


Рис. 3. Экспериментальные (сплошные) и расчётная (пунктирная) характеристики магнитоэлектрического генератора в горячем и холодном состоянии

Эту функцию можно проверить, сравнив полученные с её помощью результаты из характеристик холодного двигателя (рис. 3, кривая 1) с характеристиками, снятыми непосредственно на горячем двигателе (кривые 2, сплошная и пунктирная). Можно отметить хорошую сходимость расчётных и экспериментальных результатов, достигнутую в приводе с описанными характеристиками.

В приводе с неизвестными заранее характеристиками машины необходим предварительный их расчёт точными методами. Сеточная модель генератора, обеспечивающего ограничение скорости опускания (торможение) регулирующего органа, которая позволяет рассчитать электромагнитный момент, показана на рис. 4 (четырёхфазный шестиполусный вариант). Модель содержит элементы, относящиеся к областям магнитопровода и катушек обмотки якоря на статоре, ротора с постоянными магнитами, воздушного зазора между ними. Она позволяет точно рассчитать момент по известным значениям токов фаз обмотки в виде семейства угловых характеристик, построенных при различных значениях действующего тока в фазах, при симметричном их распределении.

Действующее значение токов предварительно рассчитывается из схемы замещения, содержащей цепь из ЭДС фазы, и её активного и индуктивного сопротивлений, и ёмкостного сопротивления нагрузки, которые являются функцией

установившейся частоты вращения ротора. На ней момент от веса РО и электромагнитный момент генератора совместно с силами трения в механизме взаимно уравниваются друг друга.

Для заданного значения установившейся частоты вращения ротора по значению ЭДС рассчитывается ток, после чего определяется зависимость тормозного электромагнитного момента от частоты вращения ротора.

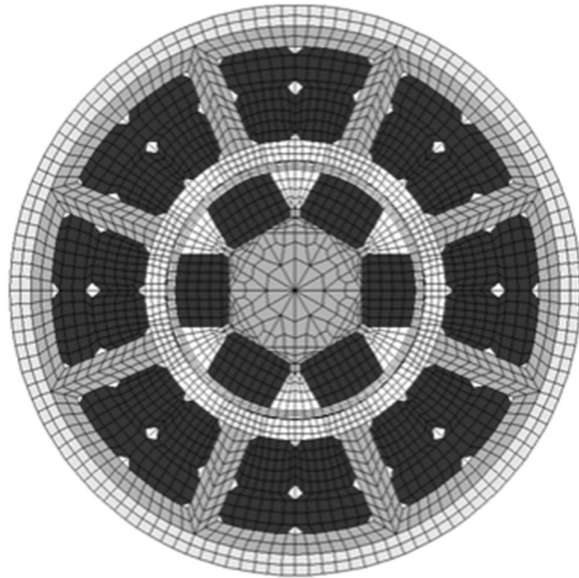


Рис. 4. Сеточная модель генератора

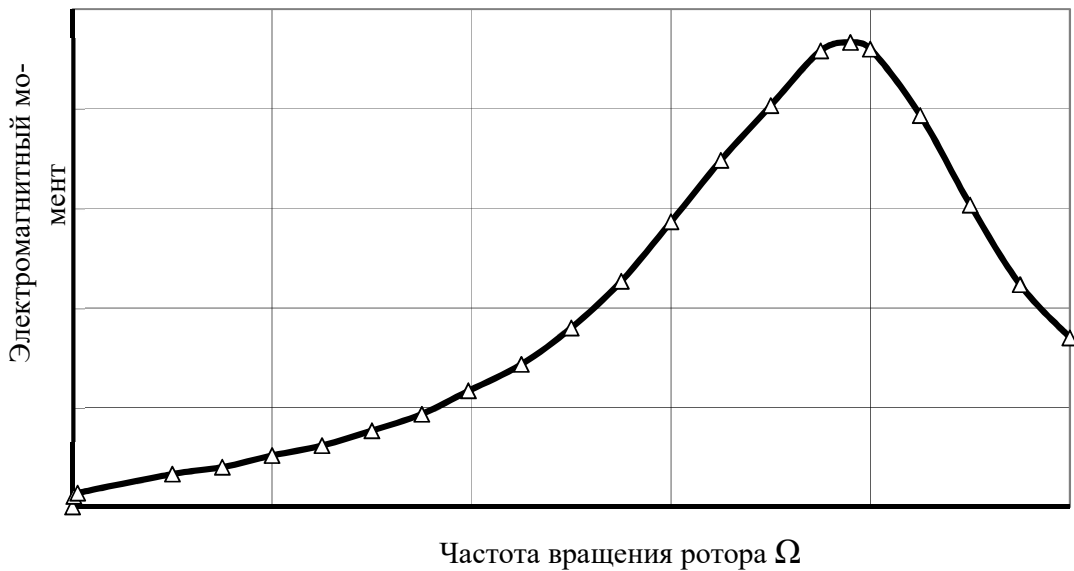


Рис. 5. Генераторная характеристика

Режимы генератора с обмотками фаз, замкнутыми на ёмкостную нагрузку, можно определить из векторных диаграмм (рис. 6).

На низкочастотном участке характеристики ток и электромагнитный момент линейно возрастают с ростом частоты вращения под влиянием роста ЭДС,

реактивный ток в цепи является индуктивным (рис. 5). На более высоких частотах сказывается влияние компенсации поля реакции якоря конденсаторами, и момент возрастает более интенсивно, вплоть до максимума, при котором наступает резонанс напряжений. Этот участок характеристики является рабочим. На нём электромагнитный момент уравнивает момент от веса регулирующего органа и последний опускается равномерно.

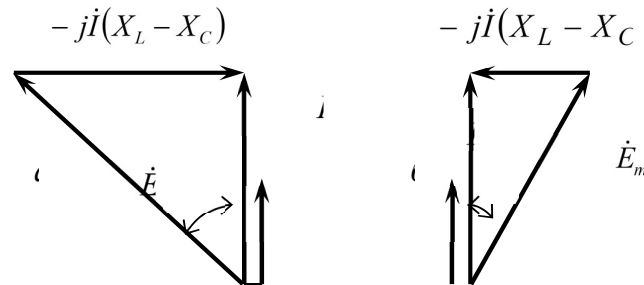


Рис. 6. Векторные диаграммы

При дальнейшем разгоне ротора реактивный ток в цепи становится ёмкостным (рис. 5), характеристика переходит на ниспадающую ветвь вследствие роста ёмкостного сопротивления. Эта ветвь соответствует неустойчивой работе: в теоретически возможном случае преодоления максимума электромагнитного момента под действием какого-либо случайного импульса нагрузки происходит неуправляемый разгон ротора.

Найденный ток подставляется в уравнение электромагнитного момента

$$M = \frac{mRI^2}{\Omega},$$

где  $m$  – число фаз обмотки генератора,  $\Omega$  – частота вращения ротора в  $rad/c$ .

Таким образом, представленные модели обесточенного электропривода вертикального перемещения регулирующего органа позволяют определить установившуюся скорость его опускания на основе баланса момента нагрузки от веса регулирующего органа и генераторного момента синхронной машины. Они могут быть получены на основе как расчётных, так и экспериментальных данных.

Интегрируя уравнение движения, в котором электромагнитный момент машины представлен генераторной характеристикой, можно определить время аварийного сброса регулирующего органа – важнейший показатель работы привода в режиме аварийной защиты энергетической установки.

### Библиографический список

- [1] **Смирнов, А.Ю.** Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов систем управления и защиты ядерных реакторов / А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов – Изв. ВУЗов, Электромеханика, 2016, №5 (47), с. 25-30.
- [2] **Смирнов, А.Ю.** Вопросы проектирования двигателей для синхронного привода систем автоматики ядерных энергетических установок / А.Ю.Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер – Электротехника, 2013, №9, с. 34-39.



- [3] Патент №2693935 на изобретение РФ. МПК H02K 29/00, G21C 7/00. Электромеханический преобразователь для вертикального перемещения регулирующего органа / А.Ю. Смирнов, В.В. Веллер, А.В. Кифоренко, Д.А. Кудряшов.
- [4] **Ивоботенко Б.А.** Планирование эксперимента в электромеханике/ Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский., И.П. Копылов М.: Энергия, 1975, 184с.
- [5] **Смирнов А.Ю.** Подразделенные обмотки и их применение в электрических машинах переменного тока. // Электричество. – 1995. - №7. – С.24-28.

A. Yu. Smirnov<sup>1,2</sup>, E. N. Alexandrova<sup>1</sup>, D. A. Kudryashov<sup>1,2</sup>

## MODEL OF THE DRIVE MOVEMENT IN THE MODE OF LOWERING THE CONTROL BODY UNDER THE ACTION OF ITS OWN WEIGHT

Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev<sup>1</sup>

JSC "Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering named after I. I. Afrikantov"<sup>2</sup>

**Abstract:** The drive for control rod vertical displacement describing, which speed bounded by means of synchronous machine, switching into generator mode after winding's current interruption.

Synchronous machine characteristics providing shaping process of appropriated law of control rod speed changing, which may be obtaining as result of experimental data processing, or by calculation of greed model. For experimental data processing the planning an experiment mathematical tool is used, which allow to take into consideration generator's permanent magnet flux temperature dependence.

**Key words:** electric drive, synchronous machine, control rod, planning an experiment, finite element method.

### References

- [1] Smirnov, A. Yu. Improvement of electromechanical devices for controlling the speed of movement of the regulatory body of the executive mechanisms of control systems and protection of nuclear reactors // A. Yu. Smirnov, D. A. Kudryashov-Izv. VUZov, Elektromekhanika, 2016, No. 5 (47), pp. 25-30
- [2] Smirnov, A. Yu. Voprosy proektirovaniya dvigatelei dlya sinkhronnogo drivoda sistem avtomatiki nernykh energeticheskikh ustanov [Questions of designing engines for synchronous drive of automation systems of nuclear power plants].
- [3] Patent No. 2693935 for the invention of the Russian Federation. IPC H02K 29/00, G21C 7/00. A. Yu. Smirnov, V. V. Weller, A.V. Kiforenko, and D. A. Kudryashov, An electromechanical converter for vertical displacement of the regulating organ .
- [4] Ivobotenko B. A. Planning an experiment in electromechanics / B. A. Ivobotenko, N. F. Ilyinsky, I. P. Kopylov M.: Energiya, 1975, 184с.
- [5] Smirnov A. Yu. Subdivided windings and their application in electric machines of alternating current. / A. Yu. Smirnov // Electricity. - 1995. - No. 7. - p. 24-28.

А.А. Чепига, Е.Е. Корытченкова, А.С. Анучин

## УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**Аннотация:** Для повышения динамических показателей системы электропривода в системе векторного управления синхронным реактивным двигателем используется стратегия управления, оптимизированная по минимуму токов статора (МТРА -maximum torque per ampere). Традиционно для такой стратегии управления рассматриваются установившиеся режимы двигателя, но не рассматриваются переходные режимы. В статье приведено сравнение стратегии управления МТРА синхронного реактивного двигателя с классической векторной системой регулирования по основным динамическим показателям.

**Ключевые слова:** синхронный реактивный двигатель, МТРА, векторная система регулирования.

Синхронные реактивные электродвигатели (СРД) только начинают активно проникать на рынок промышленных электроприводов. Долгое время они не были популярны из-за несколько меньшего коэффициента мощности, чем у АД, что требует завышения установленной мощности инвертора. Вторым фактором – невозможность работать при питании от сети – сдерживал их выход на рынок. Но с массовым переходом на частотно-регулируемый электропривод эти двигатели начали набирать популярность.

Практического применения в транспорте СРД пока не получил, однако работы по исследованию данного типа привода в транспортных применениях ведутся. Для приводов неширокого диапазона регулирования такой привод подходит, но уступает АД при том же питающем преобразователе [1]. Поэтому важной задачей для исследователей является поиск оптимального способа управления данным двигателем для улучшения его динамических показателей.

Для управления СРД применима классическая система векторного управления, для которой характерно постоянство тока намагничивания машины [2]. Однако данный метод не может обеспечить необходимых динамических показателей и минимальных омических потерь в статорных обмотках, что заставляет исследователей продолжать поиски оптимального способа регулирования для этой машины [3].

В данной работе предлагается применить метод управления СРД, основывающийся на стратегии МТРА (максимальный момент на 1 ампер), позволяющий улучшить динамические свойства машины и увеличить ее КПД.

Прежде чем перейти к описанию разработанного метода, составим

математическую модель двигателя. Для этого воспользуемся магнитной схемой замещения (рис. 1):

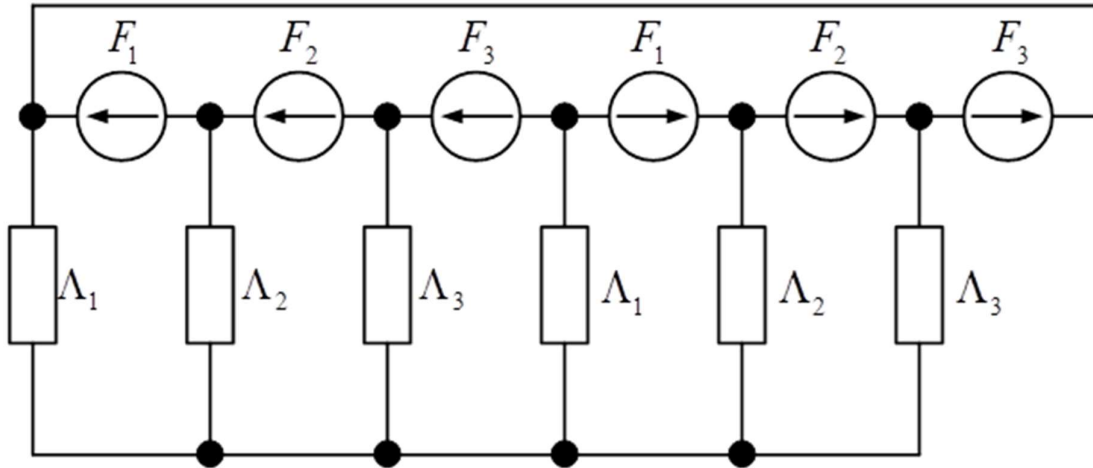


Рис. 1. Магнитная схема замещения СРД

По схеме, изображенной на рис. 1 составим уравнения изменения магнитных проводимостей фаз:

$$\begin{cases} \Lambda_1 = \lambda^0 + \lambda^1 \cdot \cos \theta; \\ \Lambda_2 = \lambda^0 + \lambda^1 \cdot \cos(\theta - 120^\circ); \\ \Lambda_3 = \lambda^0 + \lambda^1 \cdot \cos(\theta + 120^\circ). \end{cases} \quad (0)$$

Запишем уравнения для напряжений на обмотках статора:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_a}{dt} \\ \frac{d\psi_b}{dt} \\ \frac{d\psi_c}{dt} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $v_a$ ,  $v_b$  и  $v_c$  – фазные напряжения обмоток статора;

$R_s$  – эквивалентное сопротивление каждой обмотки статора;

$i_a$ ,  $i_b$  и  $i_c$  – фазные токи в обмотках статора;

$\psi_a$ ,  $\psi_b$  и  $\psi_c$  – потокосцепления обмоток статора.

Потокосцепления определяются следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ , и  $L_{cc}$  – собственные индуктивности фаз обмоток статора;

$L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}$  и  $L_{cb}$  – взаимоиндуктивности обмоток статора.

Определим матрицу индуктивностей двигателя по магнитной схеме замещения (рисунок 1):

$$\begin{cases} L_{aa} = L_s + L_m \cos(2 \cdot \theta_e); \\ L_{bb} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e - 2 \cdot \pi / 3)); \\ L_{cc} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e + 2 \cdot \pi / 3)); \\ L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + 2 \cdot \pi / 6)); \\ L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + 2 \cdot \pi / 6 - 2 \cdot \pi / 3)); \\ L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + 2 \cdot \pi / 6 + 2 \cdot \pi / 3)). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $L_s$  – самоиндуктивность статора на фазу. Это значение представляет собой среднюю самоиндуктивность каждой из обмоток статора.

$L_m$  – колебания индуктивности статора. Эта величина представляет собой амплитуду колебаний самоиндуктивности и взаимной индуктивности при изменении угла поворота ротора.

$M_s$  – взаимная индуктивность статора. Это значение представляет собой среднюю взаимную индуктивность между обмотками статора.

Применим преобразования Парка к уравнениям (2–3) и получим выражение для крутящего момента, не зависящего от угла поворота ротора. Преобразование Парка определяется по следующему выражению:

$$P = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $\theta_e$  – электрический угол положения ротора. Электрический угол зависит от механического угла ротора и количества пар полюсов:

$$\theta_e = N \cdot \theta_r, \quad (6)$$

где  $N$  – число пар полюсов;

$\theta_r$  – механический угол положения ротора.

С помощью преобразования Парка были получены следующие уравнения:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_{sd} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - N \cdot \omega \cdot i_{sq} \cdot L_{sq}; \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_{sq} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + N \cdot \omega \cdot i_{sd} \cdot L_{sd}, \end{cases} \quad (7)$$

где индуктивности по осям  $dq$  определяются по формуле:

$$\begin{cases} L_{sd} = L_s + M_s + \frac{3}{2} \cdot L_m; \\ L_{sq} = L_s + M_s - \frac{3}{2} \cdot L_m. \end{cases} \quad (8)$$

Если оба уравнения системы (7) умножить на ток соответствующей оси, то в левой части получится мощность, отбираемая из сети, в средней потери, а в правой — мощность на валу:

$$v_{sd} \cdot i_{sd} + v_q \cdot i_{sq} = (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) \cdot R_s + \omega \cdot L_{sd} \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} - \omega \cdot L_{sq} \cdot i_{sq} \cdot i_{sd}. \quad (9)$$

Если теперь правую часть разделить на скорость вращения, получится момент на валу, который полностью состоит из реактивного момента, создаваемого явнополюсностью машины:

$$\begin{cases} M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (10)$$

На основе уравнений (6–10) можно составить структурную схему СРД.

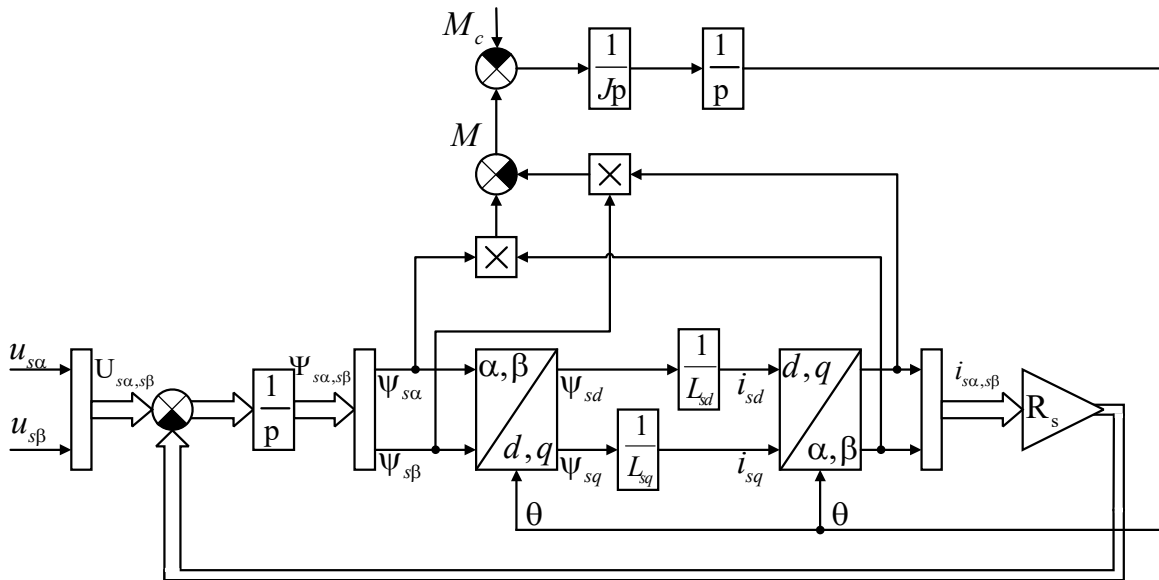


Рис. 2. Структурная схема СРД

Из-за отсутствия постоянного магнита синхронный реактивный двигатель имеет очень плохую производительность по электромагнитному моменту и относительно низкий коэффициент мощности. Стратегия МТРА (максимальный крутящий момент на ампер) является наиболее распространенным методом максимизации электромагнитного момента двигателя при заданном токе и, следовательно, также играет определенную роль в повышении КПД.

Уравнения для МТРА могут быть получены из уравнения для момента:

$$\begin{cases} M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q; \\ i_d = I_s \cdot \sin \gamma; \\ i_q = I_s \cdot \cos \gamma; \end{cases} \quad (11)$$

Подставив в уравнение момента формулы токов по продольной и поперечной осях, получим следующее выражение:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_s^2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma; \quad (12)$$

Выразим постоянную составляющую момента и примем его как конструктивный коэффициент  $K$ :

$$\begin{cases} M_{эм} = K \cdot I_s^2 \cdot \frac{\sin 2\gamma}{2}; \\ K = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (L_d - L_q). \end{cases} \quad (13)$$

Возьмем производную от момента и приравняем ее к нулю, чтобы найти угол МТРА:

$$\begin{cases} \frac{dM_{эм}}{d\gamma} = \frac{K}{2} \cdot I_s^2 \cdot \cos 2\gamma_{МТРА} = 0; \\ \gamma_{МТРА} = 45^\circ. \end{cases} \quad (14)$$

Подставим найденное значение в уравнение момента (11) и найдем величины токов по поперечной и продольной осях:

$$\begin{cases} i_d = I_s \cdot \sin 45^\circ = \frac{I_s}{\sqrt{2}}; \\ i_q = I_s \cdot \cos 45^\circ = \frac{I_s}{\sqrt{2}}. \end{cases} \quad (15)$$

Также необходимо помнить, что при отрицательном задании на электромагнитный момент, ток по оси  $q$  будет подаваться с обратным знаком.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение данного тока нецелесообразно, так как продольная ось быстро попадает в насыщение при токе, составляющем приблизительно 30% от номинального.

Структурная схема разработанного метода управления синхронным реактивным двигателем представлена на рис. 3:

В результате проведенных экспериментов в пакете MATLAB, была снята осциллограмма переходного процесса отработки двигателем заданного момента для различных методов управления СРД (рис. 4), и было выявлено, что разработанный алгоритм имеет высокие динамические показатели (табл. 1) по сравнению с классической системой векторного управления.

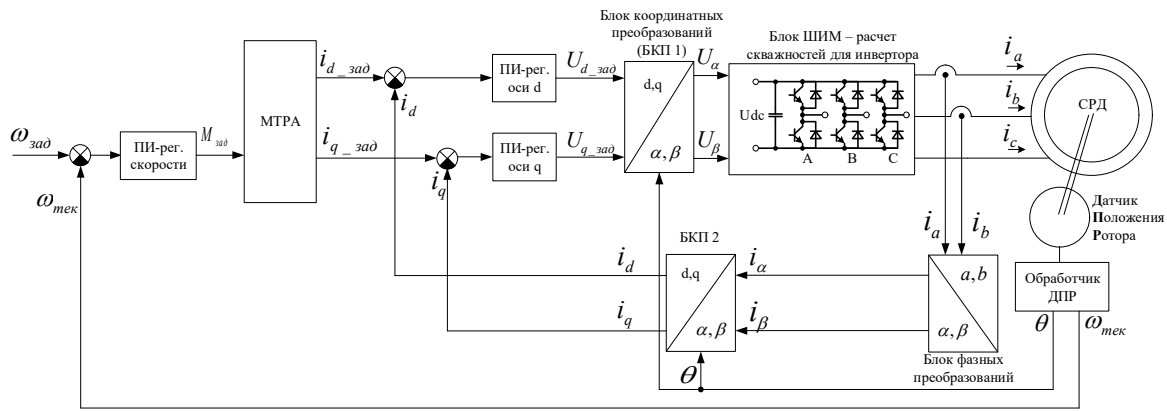


Рис. 3. Структура системы управления СРД

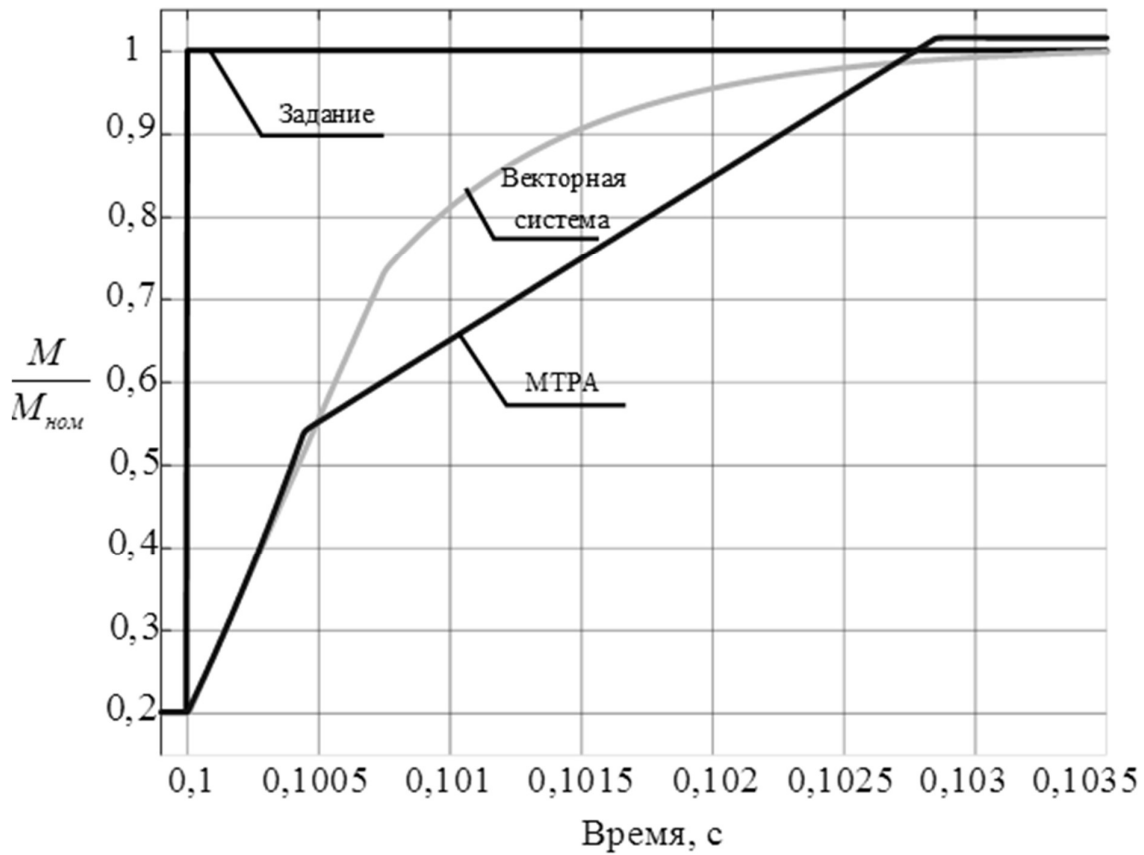


Рис. 4. Переходные процессы момента СРД при различных методах управления

Предлагаемый способ позволяет без перерегулирования сократить время первого согласования на 46% и 34% по сравнению с векторной системой и стратегией МТРА, а также уменьшить время установления на 48% и 50% соответственно.

Предложенный алгоритм будет реализован на микропроцессоре и проверен на испытательном стенде для синхронного реактивного двигателя.



Таблица 1

Динамические показатели работы различных методов управления СРД

Метод управления	Динамические показатели		
	Время первого согласования, с	Перерегулирование, %	Время установления, с
Векторная система	0,033 с	0,2 %	0,034 с
МТРА	0,027 с	1,7 %	0,036 с

Библиографический список

1. S. M. Ferdous, P. Garcia, M. A. M. Oninda and M. A. Hoque, "МТРА and Field Weakening Control of Synchronous Reluctance motor," 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, 2016, pp. 598-601, doi: 10.1109/ICECE.2016.7853991.
2. S. Piriienko, U. Ammann, M. Neuburger, "Influence of the Control Strategy on the Efficiency of SynRM Based Small-Scale Wind Generators," 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, Australia, 2019, pp. 280-285, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755122.
3. M. Nikowitz, M. Hofer and M. Schroedl, "Improvements on a Sensorless Controlled Synchronous Reluctance Machine Down to Standstill," PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2018, pp. 1-7.

---

**A.A. Chepiga, E.E. Korytchenkova, A. S. Anuchin**

## **INCREASING THE DYNAMIC PARAMETERS OF A SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
Moscow, Russia

**Abstract:** To improve the dynamic performance of the electric drive system, the Space-vector control system of a synchronous reluctance motor uses a control strategy optimized for the minimum stator currents (MTPA-maximum torque per ampere). Traditionally, for such a control strategy, steady-state drive modes are considered, but transient modes are not considered. The article presents a comparison of the MTPA control strategy of a reluctance motor with the classical Space-vector control system according to the main dynamic indicators.

**Key words:** synchronous reluctance motor, MTPA, Space-vector control system.

### **References**

- [1] S. M. Ferdous, P. Garcia, M. A. M. Oninda and M. A. Hoque, "MTPA and Field Weakening Control of Synchronous Reluctance motor," 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, 2016, pp. 598-601, doi: 10.1109/ICECE.2016.7853991.
- [2] S. Piriienko, U. Ammann, M. Neuburger, "Influence of the Control Strategy on the Efficiency of SynRM Based Small-Scale Wind Generators," 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, Australia, 2019, pp. 280-285, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755122.
- [3] M. Nikowitz, M. Hofer and M. Schroedl, "Improvements on a Sensorless Controlled Synchronous Reluctance Machine Down to Standstill," PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2018, pp. 1-7.2. compensator for assistive exoskeletons / Mechatronics .- Vol. 54. -2018. - P. 78-93

---

**Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

---

УДК 621.311.1

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_151

**Д.А. Барышников, В.В. Жуков****ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический институт»

**Аннотация:** Показана необходимость учёта влияния устройств FACTS на токи КЗ в электрических сетях. Приведены результаты исследования влияния на токи КЗ некоторых устройств FACTS, а именно: статического тиристорного компенсатора (СТК), статического компенсатора (СТАТКОМ), объединённого регулятора потоков мощности (ОРПМ), синхронного статического продольного компенсатора (ССПК), тиристорно-управляемого устройства продольной компенсации (ТУПК), управляемого шунтирующего реактора (УШР).

Исследования показали, что степень влияния различных устройств FACTS на токи КЗ отличается и в целом зависит от назначения устройств, структурных особенностей, мощности, места подключения в схеме электрической сети и вида КЗ. Наибольшее влияние на токи КЗ оказывают устройства СТК и СТАТКОМ, в меньшей мере – ОРПМ, ТУПК, УШР, что указывает на необходимость учёта указанных устройств при расчетах коротких замыканий.

**Ключевые слова:** интеллектуальные сети, устройства FACTS, ограничения токов короткого замыкания.

Совершенствование релейных защит, переводимых на микропроцессорную элементную базу, выполнение функций определения места повреждения и создание систем диагностики оборудования повышает требования к точности расчета токов КЗ с учётом нелинейности короткозамкнутых цепей, вызванной не только влиянием таких факторов как электрическая дуга в месте КЗ. Увеличение активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ, изменение индуктивного и волнового сопротивлений воздушных линий вследствие смещения их проводов, но также влияния появившихся инновационных устройств интеллектуальных сетей (устройства FACTS) [1, 2,3]. Устройства FACTS – это активные сетевые элементы с изменяющимися параметрами. Они применяются для оптимизации потокораспределения, регулирования реактивной мощности и уровня напряжения в сети, однако, в нормативно-технической документации в области расчетов токов КЗ [4] их влияние не рассматривается.

В статье представлены результаты исследования влияния устройств FACTS на токи КЗ. Необходимые расчеты проводились в программном

комплексе ЕМТР-RV, позволяющая подробно рассматривать электромагнитные переходные процессы. В качестве устройств FACTS использовались модели, созданные разработчиками указанных комплексов. В ходе расчетов анализировалось изменение мгновенного и действующего значений периодической составляющей тока КЗ, а также начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ ( $I_{П0}$ ).

**Статический тиристорный компенсатор (СТК)** применяется для повышения устойчивости и пределов передаваемой по линиям электропередачи мощности, обеспечивает регулирование напряжения и реактивной мощности при мощностях в линиях электропередачи с любой пропускной способностью.

Конструкция СТК включает следующие элементы: индуктивный реактор с воздушным охлаждением и тиристорный вентиль с масляным или водяным охлаждением, которые включены последовательно. Реактор и тиристор образуют тиристорно-реакторную группу с плавным регулированием угла зажигания тиристоров, параллельно, которой включена конденсаторная батарея и фильтро-компенсирующие цепи. Оборудование СТК обычно выполняется на класс напряжения от 10 до 35 кВ и подключается к шинам подстанции через специальный понижающий трансформатор или к третичной обмотке НН автотрансформатора подстанции [5]. Наибольший эффект наблюдается при подключении СТК непосредственно к линии электропередачи или шинам высокого напряжения.

Анализ влияния на токи КЗ статического тиристорного компенсатора, проводился в схеме система – линия – трансформатор – узел нагрузки. В качестве аварийных режимов были рассмотрены трёхфазное и однофазное (замыкание фазы А) короткие замыкания в точках К1 и К2. Номинальное напряжение сети 110 кВ, частота 50 Гц. В качестве меры удаленности системы от сборных шин использовалась величина тока трёхфазного короткого замыкания от нее, равная 12 кА. Статический тиристорный компенсатор подключается к сети на напряжение 11 кВ через понижающий трансформатор. Нагрузка в схеме моделируется постоянным отбором мощности. В ходе эксперимента значение реактивной мощности СТК принимается равным 12, 25 и 50 МВар.

Параметры элементов схемы представлены в табл. 1.

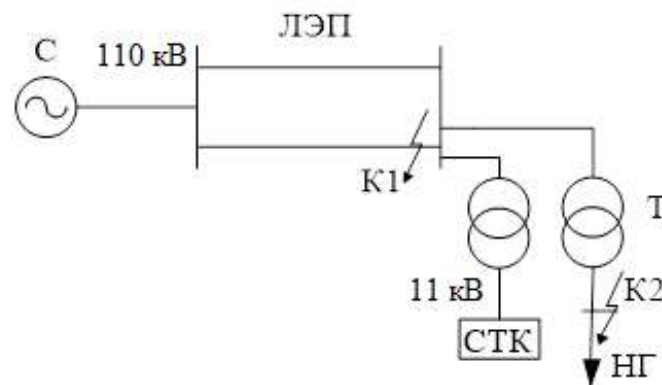


Рис. 1. Схема исследуемой сети

Таблица 1

Параметры элементов схемы с СТК

Система	Линия	Трансформатор	Нагрузка	СТК
$U = 115 \text{ кВ}$ $I_{\text{кз}} = 12 \text{ кА}$ $Ta^{(3)} = 0,05 \text{ с}$ $x_0 / x_1 = 1,5$ $r_0 / r_1 = 10$	АС – 185/29 $l = 60 \text{ км}, n_{\text{ц}} = 2$ $r_{\text{л1}} = 0,159 \text{ Ом/км}$ $x_{\text{л1}} = 0,413 \text{ Ом/км}$ $b_{\text{л}} = 2,747 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ $x_0 / x_1 = 3,5$ $r_0 / r_1 = 10$	$S = 40 \text{ МВА}$ $U_{\text{В}} = 115 \text{ кВ}$ $U_{\text{Н}} = 10,5 \text{ кВ}$ $R_{\text{T}} = 1,46 \text{ Ом}$ $X_{\text{T}} = 38,4 \text{ Ом}$	$U = 10 \text{ кВ}$ $P = 18 \text{ МВт}$ $Q = 10 \text{ МВар}$	$U = 11 \text{ кВ}$ $Q = -50/50 \text{ МВар}$ $f = 50 \text{ Гц}$

В качестве примера представлена расчётная схема исследуемой сети при трехфазном КЗ в точке К1 в программном комплексе EMTP-RV (рис. 2).

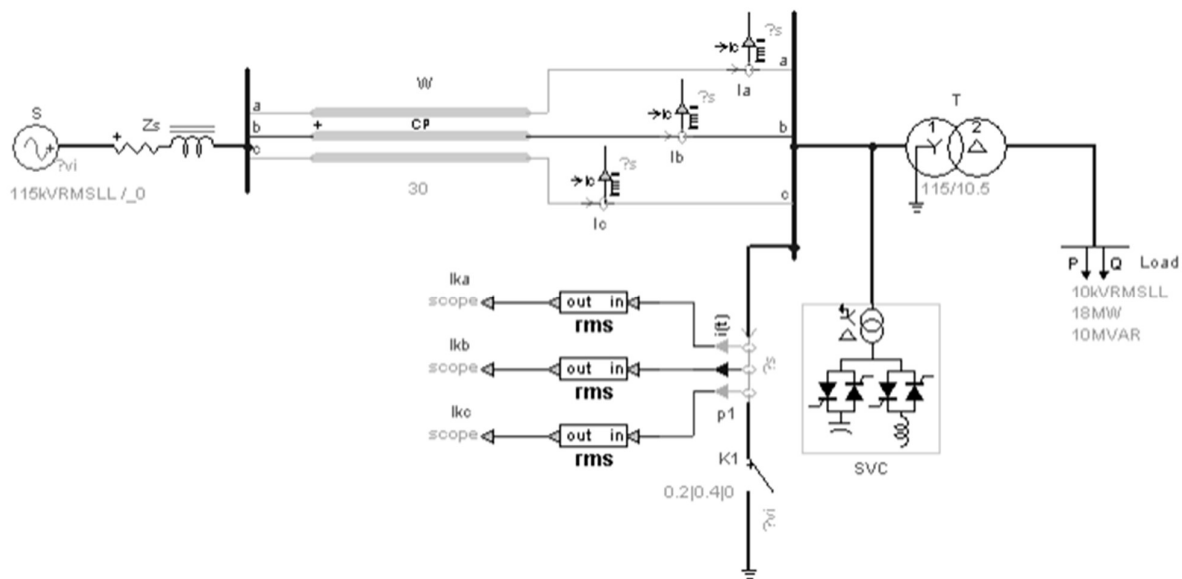


Рис. 2. Схема сети при трехфазном КЗ в сети с СТК в программном комплексе EMTP-RV

Кривые изменения тока трехфазного и однофазного КЗ представлены на рис. 3 и рис. 4.

В табл. 2 приведены расчетные токи КЗ в точках К1 и К2 в сети без СТК и с СТК мощностью 12, 25 и 50 Мвар.

В табл. 3 представлен расчет тока КЗ в процентном соотношении относительно тока КЗ в сети без СТК. Расчет выполнялся по следующей формуле:

$$\delta = \frac{I_{\text{п0}}' - I_{\text{п0}}}{I_{\text{п0}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $I_{\text{п0}}'$  - действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени в сети с СТК,  $I_{\text{п0}}$  - в сети без СТК.

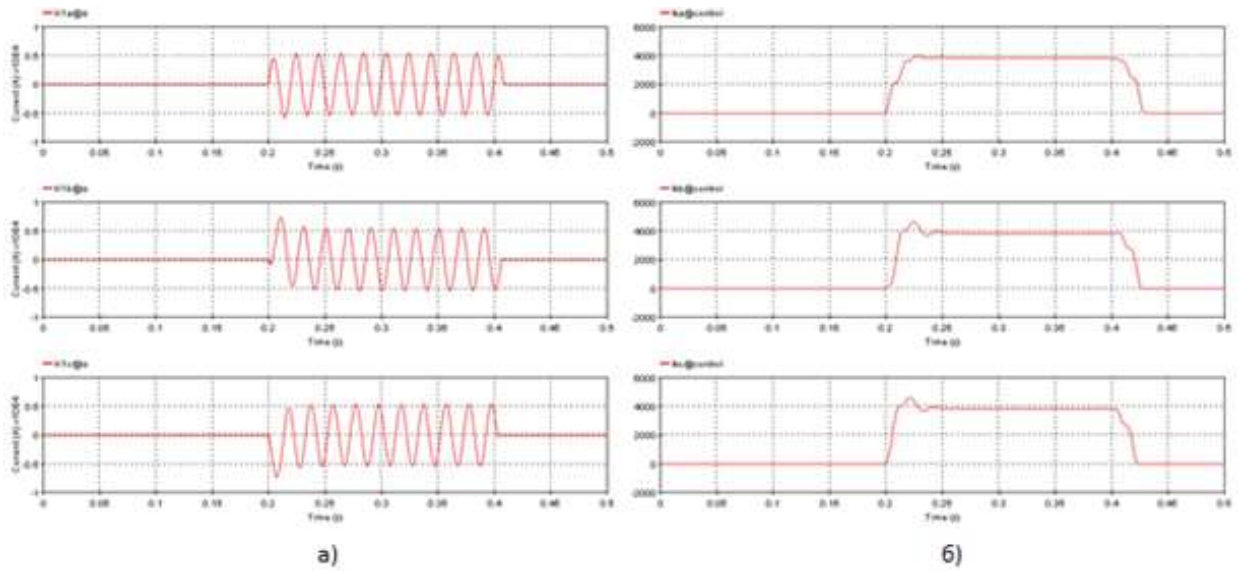


Рис. 3. Графики токов трехфазного КЗ в точке К1 при  $Q_{СТК} = 50$  Мвар:

а- мгновенного значения, кА;

б – действующего значения

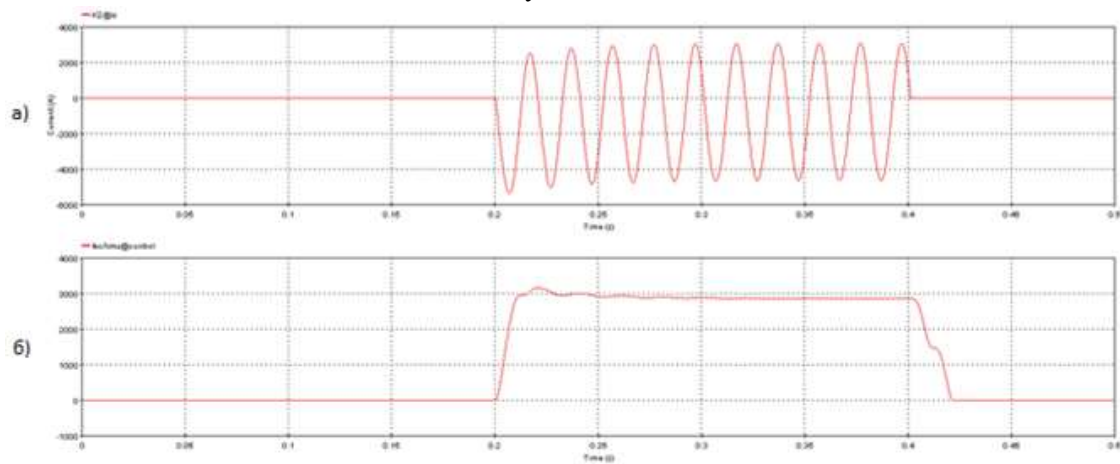


Рис. 4. Графики токов однофазного КЗ в точке К2 при  $Q_{СТК} = 50$  Мвар:

а- мгновенного значения, кА;

б – действующего значения

Таблица 2

Результаты расчетов ТКЗ с использованием СТК

$Q_{СТК}$ , Мвар	К1		К2	
	$I_{п0}^{(1)}$ , кА	$I_{п0}^{(3)}$ , кА	$I_{п0}^{(1)}$ , кА	$I_{п0}^{(3)}$ , кА
без СТК	2,86	3,56	2,79	9,26
12	3,15	3,61	2,83	9,38
25	3,43	3,68	2,85	9,53
50	3,83	3,74	2,87	9,81

Таблица 3

Результаты расчетов в процентном соотношении с использованием СТК

	$\delta, \%$			
	К1		К2	
$Q_{СТК}, \text{МВар}$	$I_{п0}^{(1)}$	$I_{п0}^{(3)}$	$I_{п0}^{(1)}$	$I_{п0}^{(3)}$
12	10,1	1,4	1,4	1,3
25	19,9	3,4	2,2	2,9
50	33,9	5,1	2,9	5,9

Анализ расчетов показал, что при наличии СТК в сети начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ при увеличении мощности СТК также увеличивается, особенно при однофазном КЗ (более 30%), поскольку СТК подпитывает место КЗ реактивным током. При трехфазном КЗ влияние проявляется в меньшей степени (не более 6%).

Учитывая, что в постоянной эксплуатации в России находятся СТК единичной мощностью до 160 Мвар, а с 2006 г. введены в промышленную эксплуатацию 17 СТК общей мощностью 920 Мвар, их влияние при КЗ может быть значительным.

По аналогии с СТК проведен анализ влияния на ток КЗ устройства СТАТКОМ, работающего в качестве устройства компенсации реактивной мощности и других устройств FACTS, а именно: ОРПМ, ССПК, ТУПК, УШР [6], в табл. 4 приведены результаты расчетов тока КЗ в сети с СТАТКОМ.

Таблица 4

Результаты расчетов ТКЗ с использованием СТАТКОМ

	К1		К2	
	$I_{п0}^{(1)}, \text{кА}$	$I_{п0}^{(3)}, \text{кА}$	$I_{п0}^{(1)}, \text{кА}$	$I_{п0}^{(3)}, \text{кА}$
без СТАТКОМ	2,86	3,56	2,79	9,26
25	3,72	3,57	2,83	9,43
50	4,71	3,61	2,91	9,76

Увеличение тока в процентном соотношении представлено в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов в процентном соотношении с использованием СТАТКОМ

	$\delta, \%$			
	К1		К2	
$Q_{СТАТКОМ}, \text{МВар}$	$I_{п0}^{(1)}$	$I_{п0}^{(3)}$	$I_{п0}^{(1)}$	$I_{п0}^{(3)}$
25	30,1	0,3	1,4	1,8
50	64,7	1,1	4,3	5,4

## Выводы

Впервые проведено исследование влияния устройств FACTS на токи КЗ. Исследование в схемах электрических сетей для приведенных в статье результатов выполнено с использованием программных комплексов EMTP-RV.

Показано, что степень влияния различных устройств на токи КЗ отличается и зависит от их назначения, конструктивных особенностей, принципа работы, мощности, места подключения в схеме сети и вида короткого замыкания.

## Библиографический список

1. **Бурман, А.П.** Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян // *Электротехника*. – 2004. – № 8. – С. 30–36.
2. **Зеленохат, Н.И.** Интеллектуализация ЕЭС России: Практическое пособие.-М.: Издательский дом МЭИ, 2013.-192 с
3. **Тухватуллин, М.М.** Анализ современных устройств FACTS используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России / М.М. Тухватуллин, В. С. Ивекеев, И. А. Ложкин, Ф. Ф. Урманова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. №3. С.41-46.
4. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ; Введ. 01.07.2008.
5. **Радилов, Т. В.** Разработка методики моделирования установившихся режимов электроэнергетических систем с гибкими электропередачами: Автореф. дис. канд. техн. наук – М.: НИУ МЭИ, 2014.
6. **Жуков, В.В.** Исследование влияния устройств FACTS на токи короткого замыкания в энергосистемах / В.В. Жуков, В.Ю. Русаков // *Энергетик* №1. 2018. С. 23-28.



D.A. Baryshnikov, V.V. Zhukov

## INFLUENCE OF SMART GRID DEVICES ON SHORT-CIRCUIT CURRENTS OF POWER SUPPLY SYSTEMS

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Abstract:** This article shows the necessity of taking into account the influence of FACTS devices on short-circuit currents in electrical networks. The author analyses the influence of some FACTS devices on the short-circuit currents, namely: static thyristor compensator (STC), static compensator (STATKOM), combined power flow controller (CPFC), synchronous static longitudinal compensator (SSLC), thyristor-controlled longitudinal compensation device (TLCD), controlled shunt reactor (CSR).

The research has shown that the degree of influence of various FACTS devices on short-circuit currents differs and generally depends on the purpose of the devices, structural features, power, connection location in the electrical network circuit and the type of short-circuit. The greatest influence on the short-circuit currents is exerted by the STC and STATKOM devices, to a lesser extent - ORPM, TUPK, USR, this indicates the need to take these devices into account when calculating short circuits.

**Key words:** intelligent networks, FACTS devices, short-circuit current limits.

### References

- [1] A. P. Burman, Yu. K. Rozanov, Yu. G. Shakaryan Prospects of application of flexible (controlled) AC power transmission systems in the UES of Russia // Electrical engineering. - 2004. - No. 8. - p. 30-36.
- [2] N. I. Zelenokhat Intellectualization of the UES of Russia: Practical guide. - M.: Publishing House of the MEI, 2013. -192 p.
- [3] Analysis of modern FACTS devices used to improve the efficiency of functioning of electric power systems in Russia\ M. M. Tukhvatullin, V. S. Ivekeev, I. A. Lozhkin, F. F. Urmanova\ Electrical systems and complexes. 2015. No. 3. pp. 41-46.
- [4] GOST R 52735-2007 Short circuits in electrical installations. Methods of calculation in electrical installations of alternating current with a voltage of more than 1 kV; Introduction. 01.07.2008.
- [5] Radilov T. V. Development of a methodology for modeling the steady-state modes of electric power systems with flexible power transmission: Autoref. dis. ... Candidate of Technical Sciences-Moscow: NRU MEI, 2014.
- [6] Zhukov V. V., Rusakov V. Yu. Investigation of the influence of FACTS devices on short-circuit currents in power systems// Energetik No. 1. 2018. pp. 23-28.

И.Р. Баязитов<sup>1</sup>, Р.Р. Галимзянов<sup>2</sup>, В.Г. Медведев<sup>3</sup>, М.И. Петров<sup>4</sup>

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТОВ РЕАКТОРОВ ДУГОГАШЕНИЯ С НЕМАГНИТНЫМИ ЗАЗОРАМИ В СЕРДЕЧНИКЕ МАГНИТОПРОВОДА

Филиал ОАО “Сетевая компания” Приволжские электрические сети<sup>1</sup>

Филиал ОАО “Сетевая компания” Казанские электрические сети<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО “Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова”<sup>3</sup>

ООО “НИР Энерго”<sup>4</sup>

**Аннотация:** В статье приведены результаты исследований влияния усеченной ширины выпучивания магнитного потока между ярмами при расчете индуктивности динамических и статических однофазных реакторов дугогашения двухстержневыми и бронестержневыми магнитопроводами с немагнитными зазорами по геометрическим параметрам устройства.

**Ключевые слова:** индуктивность реактора дугогашения, зависимость геометрических размеров реактора от индуктивности, немагнитный зазор в стальном магнитопроводе, эффективный шунтирующий магнитный поток, площадь сегмента обмотки реактора по шунтирующему магнитному потоку.

Современная тенденция цифровизации подстанций безусловно требует повышения надежности бесперебойной работы высоковольтных электрических сетей, в том числе и сетей среднего класса напряжения 6-35 кВ. С увеличением количества потребителей возрастают значения емкостных токов с одновременным повышением вероятности появления однофазных замыканий на землю. Доказано, что правильная компенсация емкостных токов, а также токов замыкания на землю способствует быстрому гашению дуги и поддержанию электрической сети в рабочем состоянии.

Известно, что роль электрических реакторов, называемых катушками Петерсена [1, 2], в обеспечении надежной работы высоковольтных сетей среднего класса напряжения вот уже более ста лет имеет важное и принципиальное значение в борьбе с емкостными токами электрической сети и последствиями однофазных замыканий на землю. Из имеющейся и доступной авторам настоящей статьи научной литературы в области исследования электрических реакторов, на наш взгляд, одними из основополагающих зарубежных и отечественных исследований, отражающих наиболее полную методику расчетов реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами, являются работы [3-10].

Вычисление индуктивности от геометрических размеров магнитопровода и обмотки реактора, в частности, вычисление эффективной площади поперечного сечения обмотки по пути шунтирующего магнитного потока показано в работах [7 - 11].

В настоящей статье сделана попытка сравнительной оценки вычисления шунтирующего магнитного потока в электрических реакторах с

бронестержневыми и стержневыми (двухстержневыми) магнитопроводами в/вне областей проекционного замыкания нижнего и верхнего ярем.

Следуя [10] суммарное потокосцепление  $\Psi_{\Sigma}$  реактора состоит из главного потокосцепления, проходящего по стали  $\Psi_{ст}$ , шунтирующего потокосцепления, проходящего вне сердечника  $\Psi_{ш}$  и описывается уравнением [7 - 11]:

$$\begin{aligned} \Psi_{\Sigma} &= \Psi_{ст} + \Psi_{ш} = \\ &= LI_p = w[B_{зая}S_{зая} + B_{ш}S_{ш}] = \\ &= w[\Phi_{ст} + \Phi_{ш}] = w[B_{ст}S_{ст} + B_{ш}S_{ш}], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $w$  - число витков обмотки;  $\Phi_{ст}$ ,  $\Phi_{ш}$  - главный (в стали) и шунтирующий магнитные потоки;  $B_{ст}$ ,  $B_{зая}$ ,  $B_{ш}$  - магнитная индукция в сердечнике (стали), в зазоре и вне стали;  $S_{ст}$ ,  $S_{зая}$ ,  $S_{ш}$  - площади сердечника, зазора и площадь сечения пути, шунтирующего путь главного потока; причем  $B_{ст}S_{ст} = B_{зая}S_{зая}$ .

$$\text{Если принять } I_p w = \frac{B_{ш} h_{об}}{\mu_0}, \text{ то } B_{ш} = \frac{\mu_0 I_p w}{h_{об}} \text{ или } B_{зая} = \frac{\mu_0 I_p w}{n l_{зая}} = \frac{B_{ст} S_{ст}}{S_{зая}},$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная. Тогда получим  $LI_p = w \left[ B_{ст} S_{ст} + \frac{\mu_0 w I_p S_{ш}}{h_{об}} \right]$ . С дру-

гой стороны полное потокосцепление равно произведению индуктивности дросселя на ток реактора.

Индуктивность  $L$  реактора с равномерными зазорами через геометрические размеры магнитопровода в соответствии с [10-14] определяется выражением:

$$L = \mu_0 w^2 \left[ \frac{S_{зая}}{n l_{зая}} + \frac{S_{ш}}{h_{об}} \right], \quad (2)$$

где  $S_{зая} = S_{ст} + \Delta S$  - эквивалентное сечение сердечника;  $n$  - количество зазоров;

$l_{зая}$  - длина одного зазора;  $S_{ш} = S_{вн} - S_{ст} - \frac{3\Delta S}{4} + S_{1/3}$ ;  $S_{вн} = \frac{\pi(D_{ст} + 2a)^2}{4}$  - площадь круга по внутреннему диаметру круглой обмотки;  $D_{ст}$  - диаметр сердечника;  $S_{ст}$  - сечение (площадь) сердечника;  $\Delta S = 2(c + d + 2\varepsilon)\varepsilon$  - коэффициент вычисления уширения с учетом  $\varepsilon$ ;  $c, d$  - стороны сечения сердечника в

соответствии с [10];  $S_{1/3} = \frac{l_{\text{эфф}} b}{3}$  - площадь трапеции, равной площади обмотки реактора на толщине  $b/3$  от внутреннего диаметра;  $l_{\text{эфф}}$  - длина окружности обмотки эффективной зоны участка шунтирующего потока;  $\varepsilon$  - выпуклость магнитного поля в зазоре;  $a$  - расстояние от обмотки до сердечника;  $b$  - радиальный размер (толщина) обмотки;  $h_{\text{об}}$  - высота обмотки.  $l_{\text{эфф}} = \pi \left( D_{\text{ст}} + 2a + \frac{b}{3} \right)$ ;

$$S_{1/3} = \pi \left( D_{\text{ст}} + 2a + \frac{b}{3} \right) \frac{b}{3} \quad [10, 11].$$

Допуская проявление шунтирующего магнитного потока только между ярами и его отсутствием за “бортами” ярем, частично изменится выражение для  $S_{\text{ш}}$ . Поэтому, на наш взгляд, для расчета шунтирующего потока достаточно учитывать площади, закрашенные серым фоном на рис. 1, которые охватывают области между нижним и верхним ярами.

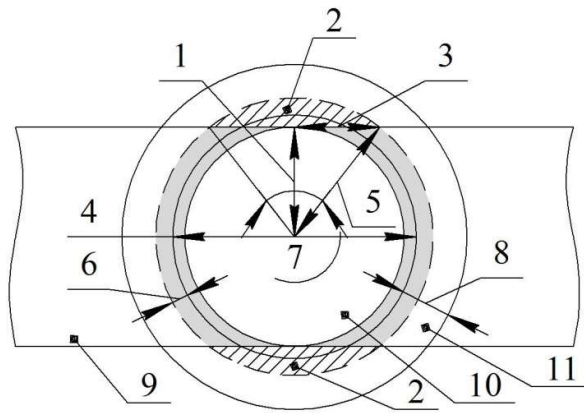


Рис. 1. К расчету площади  $S_{\text{ш}}$  шунтирующего потока  $\Psi_{\text{ш}}$ :

1 – радиус стержня  $D_{\text{ст}}/2$ ; 2 - площадь бокового сегмента  $S_{\text{сег}}$  с отсутствующим шунтирующим магнитным потоком  $\Psi_{\text{ш}}$ ; 3 – половина основания  $x$  выделенного сегмента  $S_{\text{сег}}$  (заштрихованные области); 4 - расстояние  $D_{\text{ст}} + 2a$ ; 5 - расстояние  $\frac{D_{\text{ст}}}{2} + a + \frac{b}{3}$ ; 6 – третья часть  $\frac{b}{3}$  радиального размера обмотки; 7 – угол  $\alpha$ ; 8 - радиальный размер обмотки  $b$ ; 9 – область нижнего верхнего ярем магнитопровода бронестержневой конструкции; 10 – область стержня; 11 – обмотка

При этом нужно уделить особое внимание для отдельного расчета индуктивности бронестержневого и стержневого [14] (двухстержневого [11]) реакторов.

Учитывая  $S_{\text{сег}} = \frac{r^2 (\pi\alpha/180^\circ - \sin(\alpha))}{2}$ , где  $\alpha = \arccos \left( 1 - \frac{2x^2}{r^2} \right)$ ,

$x = \sqrt{\left(D_{\text{ст}} + 2a + \frac{b}{3}\right)^2 - \left(\frac{D_{\text{ст}}}{2}\right)^2}$ ,  $r = \frac{D_{\text{ст}}}{2} + a + \frac{b}{3}$ , получим выражение площади шунта только между ярмами магнитопровода для реактора с бронестержневой конструкцией в виде  $S_{\text{ш}} = S_{\text{вн}} - S_{\text{ст}} - \frac{3\Delta S}{4} + S_{1/3} - 2S_{\text{сер}}$ .

Предложенные здесь выражения корректировки определения величин эффективной площади обмотки реакторов по шунтирующему магнитному потоку на основе численных расчетов показывают значительное влияние на точность вычисления эффективной площади обмотки реактора дугогашения по шунтирующему магнитному потоку в частности, а также на результат нахождения индуктивного сопротивления в целом.

Результаты расчетов вычисления индуктивности  $L$  дугогасительного реактора при изменении  $S_{\text{сер}}$  в диапазоне от  $S_{\text{сер}} = 0$  до его максимального значения приведены на рис. 2.

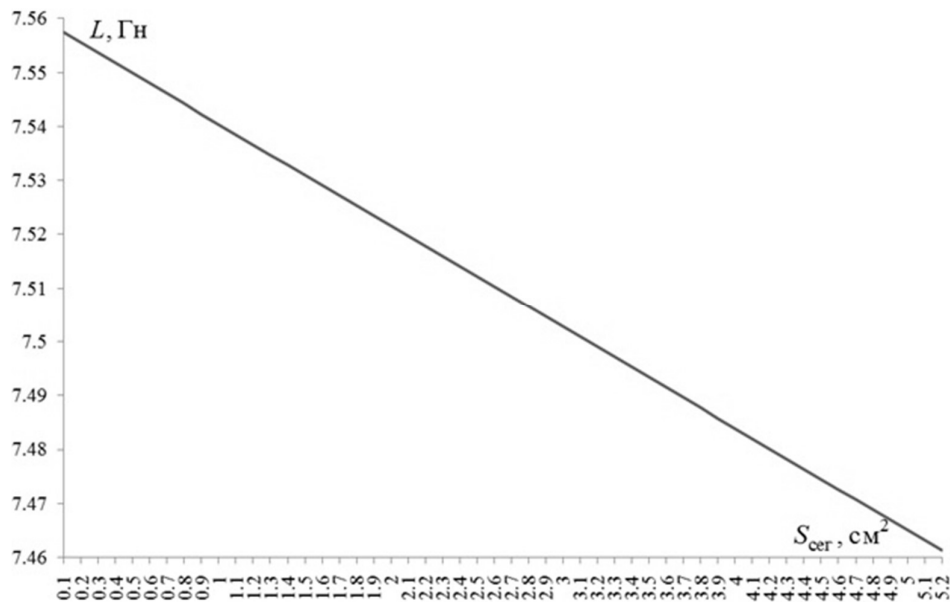


Рис. 2. График зависимости индуктивности  $L$  от  $S_{\text{сер}}$

При изменении значения  $S_{\text{сер}}$  от 0 до максимального его значения с выбранными в соответствии с [10] геометрическими параметрами дугогасительного реактора разница в значении индуктивности меняется в пределах 0,1 Гн. Последнее несомненно сказывается на:

- 1) точности работы как многих цифровых устройств существующих подстанций в частности, так и вновь внедряемых цифровых подстанций в целом, что в относительной степени отражено авторами в работах [15-19];

2) технико-экономических показателях устройства дугогашения при решении обратной задачи нахождения резонансного значения индуктивности по геометрическим параметрам реактора.

### Библиографический список

1. Petersen W., "Der aussetzende Erdschluss", ETZ, Bd 38, S. 553-555; ETZ, Bd 47, S. 564-566; ETZ, Bd 48, 1917.
2. Petersen W., "Limitation of earth current and suppression of earth fault arcs by the earthing coil", ETZ Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 40, 1919. Jan; 40 (5-7): 17-9.
3. Petersen W. Forschung und Technik. Verlag Julius Springer, Berlin 1930. 576 p.
4. **Буткевич, Г.В.** Реакторы / Г.В. Буткевич, В.В. Михайлов, И.И. Ротгауз. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1933, 184с.
5. **Петров, Г.Н.** Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. / Г.Н. Петров // Энергия. Москва. 1974 – 240 с.
6. Willheim R. Das Erdschlufproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1936, 342 p.
7. Waters Malcolm., The calculation of flux, losses and forces in ironcored reactors with distributed air gaps, EI. Res. Assoc., London, Report Q/T 137, 1952.
8. Willheim, R., Waters M., Rudenberg R. Neutral Grounding in High-Voltage Transmission. Elsevier Science Ltd, 1956, 670 p.
9. **Вильгельм, Р.** Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгельм, М. Уотерс. – М. . – Л.: Госэнергоиздат, 1959, 415 с.
10. **Манькин, Э.А.** Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами / Э.А. Манькин // Электричество. 1959. № 7. С. 35 – 40.
11. **Кузьмин, А.А.** К вопросам оценки параметров активной части реактора дугогашения с распределенными зазорами / А.А. Кузьмин, В.В. Медведев, М.И. Петров, И.Г. Хадыев // Вестник Чувашского университета. – 2019. - № 3. – С. 119 – 126.
12. Kulda J. Induktivitat einer drosselspule mit luftspalt im esenkern // Acta technica/ 1961 № 3. P. 251 – 270.
13. Ружка Антонова. Определяне на работната въздушна междина в дъгогасителна бобина с подвижно ядро посредством ЕЦИМ. Електропромишленост и приборостроене. София 1972. №2. С. 56-59.
14. **Лейтес, Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
15. **Баязитов, И.Р.** К вопросам активного симметрирования фазных напряжений в электрической сети с малыми токами замыкания на землю / И.Р. Баязитов, Р.Р. Галимзянов, В.Г. Медведев, М.И. Петров // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов ХЛII Меж-дунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С.151-155.
16. **Базаррагчаа, А.** Повышение эффективности систем компенсации емкостных токов с реакторами со ступенчатым регулированием / А. Базаррагчаа, И.Р. Баязитов, В.Г. Медведев, М.И. Петров, А.В. Сентябрев // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов ХЛII Меж-дунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 156-160.
17. **Баязитов, И.Р.** Статические дугогасящие реакторы с регулированием по вторичным обмоткам / И.Р. Баязитов, В.Г. Медведев, Е.М. Петров, М.И. Петров // Кибернетика

- энергетических систем: сборник материалов XLII Меж-дунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 161-166.
18. **Баязитов, И.Р.** К вопросам применения плавнорегулируемых дугогасящих реакторов / И.Р. Баязитов, В.В. Карчин, В.Г. Медведев, Е.М. Петров, М.И. Петров // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XLII Меж-дунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 167-171.
19. **Баязитов, И.Р.** К алгоритмам управления активным током замыкания на землю и добротностью контура нулевой последовательности электрической сети / И.Р. Баязитов, Р.Р. Галимзянов, Е.В. Гришин, Д.С. Засимов, В.Г. Медведев, М.И. Петров // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XLII Меж-дунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 172-177.

I.R. Bayazitov<sup>1</sup>, R.R. Galimzyanov<sup>2</sup>, V.G. Medvedev<sup>3</sup>, M.I. Petrov<sup>4</sup>

## SOME ISSUES OF CALCULATION OF ARC EXTINGUISHING REACTORS WITH NONMAGNETIC GAP IN THE CORE OF A MAGNETIC DUCT

Branch of OJSC "Grid Company" Privolzhskie Electric Grids<sup>1</sup>  
Branch of JSC "Grid Company" Kazan Electric Grids<sup>2</sup>  
FSBEI HE "Chuvash State University named after I.N. Ulyanov"<sup>3</sup>  
LLC "NIR Energo"<sup>4</sup>

**Abstract:** The article presents the results of studies of the effect of the truncated width of the buckling of the magnetic flux between the yokes when calculating the inductance of dynamic and static single-phase arc suppression reactors with double-rod and armored-rod magnetic circuits with non-magnetic gaps in terms of the geometric parameters of the device.

**Key words:** inductance of the arc suppression reactor, dependence of the geometrical dimensions of the reactor on the inductance, non-magnetic gap in the steel magnetic core, effective shunt magnetic flux, area of the reactor winding segment by the shunt magnetic flux.

### References

- [1] Petersen W., "Der aussetzende Erdschluss", ETZ, Bd 38, S. 553-555; ETZ, Bd 47, S. 564-566; ETZ, Bd 48, 1917.
- [2] Petersen W., "Limitation of earth current and suppression of earth fault arcs by the earthing coil", ETZ Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 40, 1919. Jan; 40 (5-7): 17-9.
- [3] Petersen W. Forschung und Technik. Verlag Julius Springer, Berlin 1930. 576 p.
- [4] Butkevich G.V., Mihajlov V.V., Rotgauz I.I. Reaktory. – M. – L.: Gosenergoizdat, 1933, 184s.
- [5] Petrov G.N. Elektricheskie mashiny. CH. 1. Transformatory. Energiya. Moskva. 1974 – 240 s.
- [6] Willheim R. Das Erdschlufproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1936, 342 p.
- [7] Waters Malcolm., The calculation of flux, losses and forces in ironcored reactors with distributed air gaps, EI. Res. Assoc., London, Report Q/T 137, 1952.
- [8] Willheim, R., Waters M., Rudenberg R. Neutral Grounding in High-Voltage Transmission. Elsevier Science Ltd, 1956, 670 p.
- [9] Vil'gel'm R., Uoters M. Zazemlenie nejtrali v vysokovol'tnyh sistemah. – M. . – L.: Gosenergoizdat, 1959, 415 c.
- [10] Man'kin E.A. Raschet reaktorov so stal'nym magnitoprovodom i zazorami. // Elektrichestvo. 1959. № 7. S. 35 – 40.
- [11] Kuz'min A.A., Medvedev V.V., Petrov M.I., Hadyev I.G. K voprosam ocenki parametrov aktivnoj chasti reaktora dugogasheniya s raspredelennymi zazorami // Vestnik CHuvashskogo universiteta. – 2019. № 3. – S. 119 – 126.
- [12] Kulda J. Induktivitat einer drosselspule mit luftspalt im esenkern // Acta technica/ 1961 № 3. P. 251 – 270.
- [13] Ruzhka Antonova. Opredelyane na rabotnata v"zdushna mezhcina v d"ogositelna bobina s podvizhno yadro posredstvom ECIM. Elektropromishlenost i priborostroene. Cofiya 1972. №2. S. 56-59.
- [14] Lejtes L.V. Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov. – M.: Energiya, 1981. – 392 s.
- [15] Bayazitov I.R., Galimzyanov R.R., Medvedev V.G., Petrov M.I. K voprosam aktivnogo simmetrirovaniya faznyh napryazhenij v elektricheskoy seti s malymi tokami zamykaniya na zemlyu // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov HLII Mezh-dunar. nauch.-tekhn. konf.,



- g. Novocherkassk, 24-26 noyabrya 2020 g. / YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2020. – S.151-155.
- [16] Bazarragchaа A., Bayazitov I.R., Medvedev V.G., Petrov M.I., Sentyabrev A.V. Povyshenie effektivnosti sistem kompensacii emkostnyh tokov s reaktorami so stupenchatym regulirovaniem // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov HLII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Novocherkassk, 24-26 noyabrya 2020 g. / YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2020. – S. 156-160.
- [17] Bayazitov I.R., Medvedev V.G., Petrov E.M., Petrov M.I. Sticheskie dugogasyashchie reaktory s regulirovaniem po vtorichnym obmotkam // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov HLII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Novocherkassk, 24-26 noyabrya 2020 g. / YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2020. – S. 161-166.
- [18] Bayazitov I.R., Karchin V.V., Medvedev V.G., Petrov E.M., Petrov M.I. K voprosam primeniya plavnoreguliruemyyh dugogasyashchih reaktorov // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov HLII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Novocherkassk, 24-26 noyabrya 2020 g. / YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2020. – S. 167-171.
- [19] Bayazitov I.R., Galimzyanov R.R., Grishin E.V., Zasimov D.S., Medvedev V.G., Petrov M.I. K algoritmam upravleniya aktivnym tokom zamykaniya na zemlyu i dobrotnost'yu kontura nulevoj posledovatel'nosti elektricheskoy seti // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov HLII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Novocherkassk, 24-26 noyabrya 2020 g. / YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2020. – S. 172-177.

**В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, О.М. Ларин**

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ФЛИКЕРА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Юго-Западный государственный университет

***Аннотация.*** В статье рассматриваются вопросы качества электроэнергии в системах электроснабжения. Показано, что возникновение быстрых колебаний напряжения приводит к негативным воздействиям на зрение из-за колебаний светового потока электрических источников света. Показано на компьютерной модели простейшей системы электроснабжения, что использование производных токов и напряжений нагрузки может быть использовано для выявления причин несимметрии - разные значения мощности (сопротивления) трехфазной нагрузки или же различными значениями фазных напряжений питающей сети.

***Ключевые слова:*** качество, электроэнергия, фликер, резкопеременная нагрузка, компьютерное моделирование.

В настоящее время электрическая энергия (ЭЭ) является товарной продукцией, производимой для ее реализации потребителям. Следовательно, при поставке электроэнергии потребителям должны соблюдаться утвержденные нормы качества электрической энергии (КЭЭ), так как только при использовании электроэнергии надлежащего качества создаются нормальные условия работы различного электрического оборудования и электроприемников.

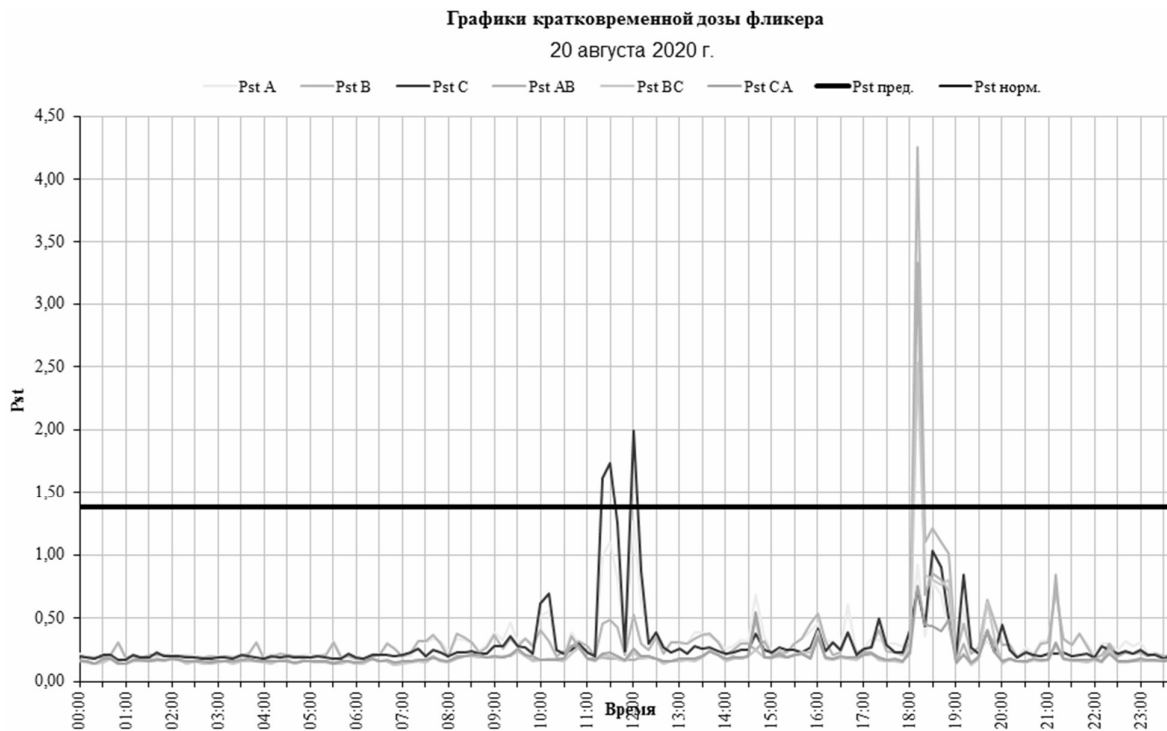
Само КЭЭ устанавливается как степень соответствия определенных характеристик электроэнергии в точках передачи ЭЭ пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц [1]. Данные точки находятся на линии разделения поставщиков ЭЭ и потребителей ЭЭ по признаку собственности.

Нормативные значения ПКЭ устанавливаются для параметров напряжения электрической сети [1, 2]. Эти параметры в системах электроснабжения постоянно изменяются в результате проявления различных факторов, например, суточных или сезонных изменений электрических нагрузок потребителей ЭЭ, возникновения электромагнитных помех при включении и отключении электрооборудования, а также других причин, описанных в различных источниках, например [2, 3].

Одним из факторов нарушения КЭЭ являются колебания напряжения в электрической сети. Эти колебания неблагоприятно влияют на работу электроприемников (ЭП), особенно осветительных установок, вызывая у них быстрые изменения светового потока, воспринимаемые человеком в виде мерцания света, это явление называется фликером. Фликер вызывает у человека утомление, в

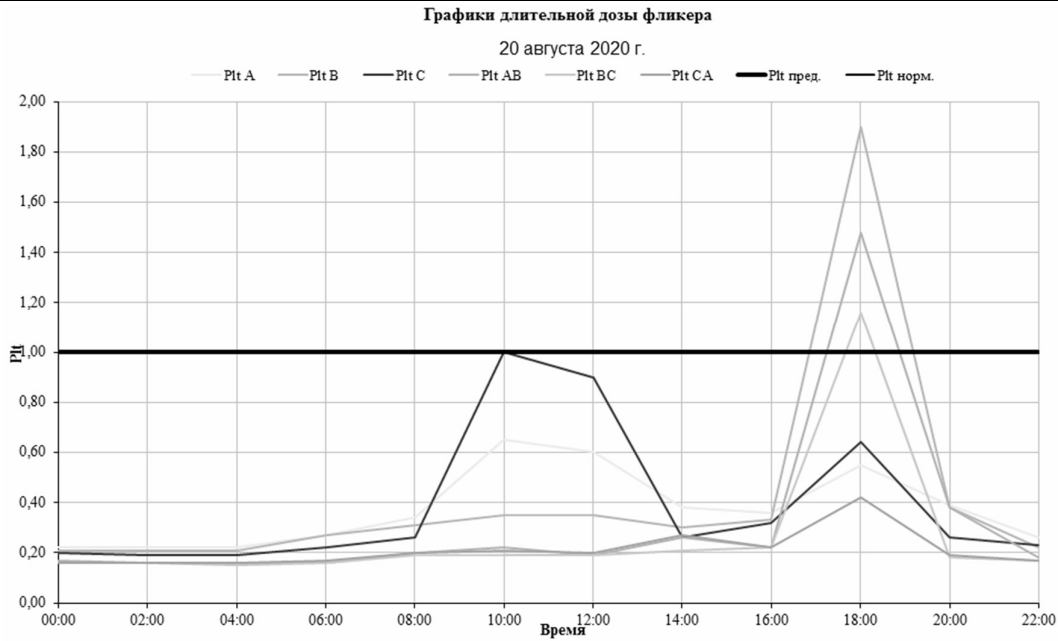
связи с чем возникает увеличение брака продукции и травматизма на производстве [4–6].

Превышение допустимых значений кратковременной и длительной доз фликера возникает в электрических сетях с той или иной степенью повторяемости. На ниже приведенных рис.1 и рис.2 показаны суточные графики изменения показателей КЭЭ, относящихся к фликеру. Эти графики были получены авторами статьи при мониторинге КЭЭ на одном энергетическом объекте. По этим рисункам видно, что за рассматриваемые сутки происходит нарушение норм показателей КЭЭ, установленных для фликера.



**Рис. 1. Суточный график кратковременной дозы фликера**

В различных источниках указывается, что появление значительных доз фликера связано, прежде всего, с наличием в составе потребителей ЭП с резкопеременным режимом [5–7]. Работа подобных ЭП также сопровождается появлением интергармонических составляющих сетевого напряжения [8]. Выявление потребителей ЭЭ, создающих значительные колебания напряжения, может производиться приборами, предназначенными для измерений ПКЭ [9]. Но такие приборы имеют довольно высокую стоимость, что делает задачу разработки сравнительно простых средств определения мест возникновения фликера достаточно актуальной.



**Рис. 2. Суточный график длительной дозы фликера**

Рассмотрим результаты измерений интергармонических составляющих напряжения фазы В, усредненных за 10 минут, полученные в интервал времени, включающий в себя возникновение нарушения допустимых норм фликера (табл. 1).

**Таблица 1**

**Значения интергармонических составляющих напряжения**

Дата	Время	$K_{UB\ ig(1)}$	$K_{UB\ ig(2)}$	$K_{UB\ ig(3)}$	$K_{UB\ ig(4)}$	$K_{UB\ ig(5)}$
		20.08.20	17:50	0,03	0,02	0,01
20.08.20	18:00	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02
20.08.20	18:10	0,12	0,04	0,02	0,02	0,02
20.08.20	18:20	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
20.08.20	18:30	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03
20.08.20	18:40	0,06	0,05	0,05	0,03	0,03
20.08.20	18:50	0,04	0,03	0,01	0,02	0,02

Из этой таблицы видно, что в момент превышения норм фликера значения интергармонических составляющих значительно возрастают, что можно использовать для поиска мест возникновения недопустимых значений фликера. Но аппаратная реализация такого устройства регистрации интергармоник требует использования фильтров различных частот с высоким уровнем добротности, чтобы обеспечить высокую селективность выявления интергармоник.

Рассмотрим возможность применения более простого способа регистрации интергармоник с использованием операций дифференцирования токов в электрической сети. Произведем компьютерное моделирование простейшей системы электроснабжения, схема которой приведена на рис.3.

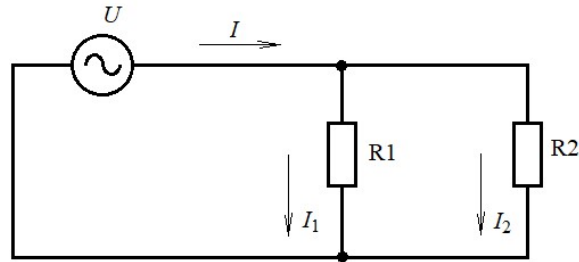


Рис. 3. Схема простейшей системы электроснабжения

На этой схеме от источника переменного напряжения питаются два ЭП, представленные в виде активных сопротивлений R1 и R2. Сопротивление R1 моделирует ЭП с резкопеременным характером работы, а сопротивление R2 - ЭП со спокойным характером работы. На рис.4 приведена схема компьютерной модели, разработанной в пакете Simulink системы научно-технических расчетов MatLab.

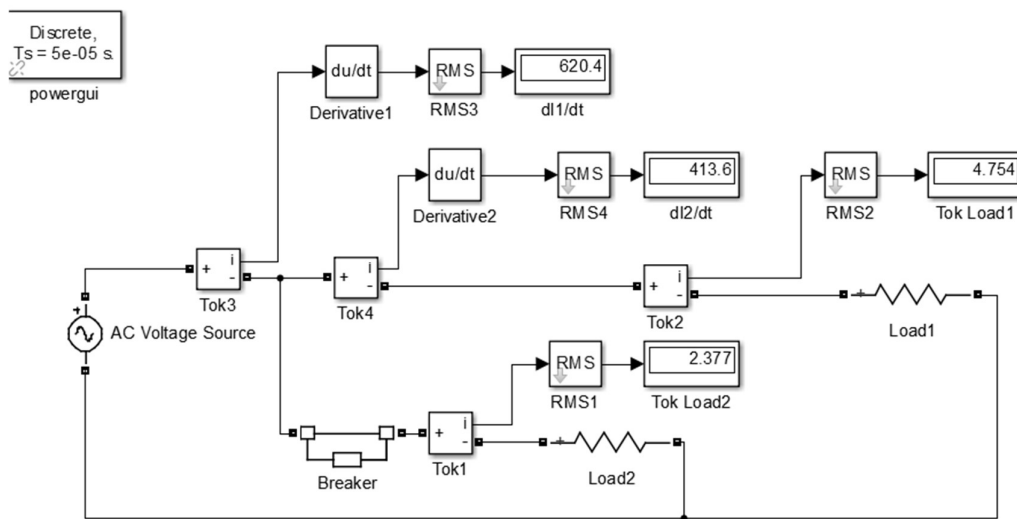


Рис. 4. Компьютерная модель простейшей системы электроснабжения

Ток  $I$  представляет собой сумму двух токов – тока резкопеременной нагрузки (Load2 на компьютерной модели) и тока спокойной нагрузки (Load1 на компьютерной модели). Для каждого из этих токов определяется производная элементами Tok, Derivative, RMS и дисплей для вывода значений  $dI/dt$ . Также для каждой нагрузки производилось измерение токов. Резкопеременный характер нагрузки создавался при помощи управляемого ключа Breaker, производившего частое подключение и отключение нагрузки Load2).

В результате моделирования было найдено значение производной тока двух нагрузок, равное 620,4. Для тока нагрузки Load1 значение производной тока оказалось равным 413,6 или в полтора раза меньше. В реальных измерительных схемах значение производной тока можно получать с помощью дифференцирующих цепочек, имеющих значительно более простое устройство, чем комплекс

фильтров с высокой степенью добротности. Это позволяет производить оценку местоположения ЭП, создающих недопустимые значения фликера в электрической сети, сравнительно простыми аппаратными средствами.

Приведенные результаты компьютерного моделирования показывают возможность использования для мониторинга источников с повышенным значением фликера производных токов контролируемых цепей. Для этой цели следует использовать простые по технической реализации дифференцирующие цепочки. Применение таких параметров позволит по мере увеличения содержания фликера в электрической сети достаточно точно определить местоположение ЭП, вызывающих значительные колебания напряжения в электрической сети и недопустимые значения кратковременной и длительной доз фликера, создающих значительные колебания светового потока электрических источников света, которые, в свою очередь, негативно влияют на зрение человека.

### Библиографический список

1. **Коверникова, Л.И.** Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов - Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
2. **Коверникова Л.И.** Качество электроэнергии в ЕЭС России: Текущие проблемы и необходимые решения / Л.И. Коверникова, В.Н. Тульский, Р.Н. Шамонов // *Электроэнергия: Передача и распределение*. 2016. № 2(35). С. 28–38.
3. **Дед А. В.** Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций / А. В. Дед, С. П. Сикорский П. С. , Смирнов // *Омский научный вестник*. 2018. № 2 (158). С. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.
4. **Черепанов В.В.** Расчет кратковременной дозы фликера, возникающей при стохастическом характере изменения электрических нагрузок / В.В. Черепанов, Е.А. Калинина // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11-5. С. 960-967.
5. **Лисицкий К.Е.** Совершенствование методов и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети // *Известия высших учебных заведений, проблемы энергетики*. 2018. Т.20. №5-6. С.55-66.
6. **Лисицкий К.Е.** Совершенствование средств оценки и методов нормализации фликера при использовании источников света с различной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети // *Промышленная энергетика*. 2018. № 10. С. 21.
7. **Корнилов Г.П.** Расчет кратковременной дозы фликера в электрических сетях предприятий / Г.П. Корнилов, И.И. Баранкова, Г.И. Лукьянов, А. Л. Карякин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. №3. С.10-15.
8. **Гапиров Р.А.** Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом / Р.А. Гапиров, Д.С Осипов // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 5.
9. V.I. Biryulin, D.V. Kudelina, O.M. Larin, “Electricity quality problems in the 0.4 kV city electric networks”, 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048.

V.I. Biryulin<sup>1</sup>, D.V. Kudelina<sup>1</sup>, O. M. Larin<sup>1</sup>

IDENTIFICATION OF THE FLICKER SOURCE IN THE POWER SUPPLY  
SYSTEMS

Southwest State University, Russia<sup>1</sup>

**Abstract:** The article deals with the quality of electricity in power supply systems. It is shown that the occurrence of rapid voltage fluctuations leads to negative effects on vision due to the fluctuations in the luminous flux of electrical light sources. It is shown on a computer model of the simplest power supply system that the use of derivatives of load currents and voltages can be used to identify the causes of asymmetry – different values of power (resistance) of a three-phase load or different values of phase voltages of the supply network.

**Key words:** quality, electricity, flicker, abruptly variable load, computer simulation.

References

- [1] L.I. Kovernikova, V.V. Sudnova, R.G. Shamonov, *Kachestvo elektricheskoy energii: sovremennoye sostoyaniye, problemy i predlozheniya po ikh resheniyu [Electricity quality: current state, problems and proposals for their solution]*. Novosibirsk: Nauka, 2017. (in Russian)
- [2] L.I. Kovernikova, V.N. Tulsy, R.N. Shamonov, “Electricity quality in the UES of Russia: Current problems and necessary solutions”, *Electricity: Transmission and distribution*, no. 2 (35), pp. 28–38. (in Russian)
- [3] A.V. Ded, S.P. Sikorsky, P.S. Smirnov, “Measurement results of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations”, *Omsk Scientific Bulletin*, no. № 2 (158), pp. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64. (in Russian)
- [4] V.V. Cherepanov, E.A. Kalinina, “Calculation of the short-term dose of flicker arising from the stochastic nature of changes in electrical loads”, *Fundamental research*, no. 11-5, pp. 960-967. (in Russian)
- [5] K.E. Lissitzky, “Improvement of methods and means for assessing flicker when using light sources with different sensitivity to voltage fluctuations in the electrical network”, *News of higher educational institutions, energy problems*, vol. 20, no. 5-6, pp.55-66. (in Russian)
- [6] K.E. Lissitzky, “Improvement of assessment tools and methods of flicker normalization when using light sources with different sensitivity to voltage fluctuations in the electrical network”, *Promyshlennaya energetika*, no. 10, pp. 21. (in Russian)
- [7] G.P. Kornilov, I.I. Barankova, G.I. Lukyanov, A.L. Karyakin, “Calculation of the short-term dose of flicker in the electrical networks of enterprises”, *Electrotechnical systems and complexes*, no. 3, pp.10-15. (in Russian)
- [8] R.A. Gapirov, D.S. Osipov, “Standardization of interharmonics as an indicator of the quality of electricity in Russia and abroad”, *Modern problems of science and education*, no. 5. (in Russian)
- [9] V.I. Biryulin, D.V. Kudelina, O.M. Larin, “Electricity quality problems in the 0.4 kV city electric networks”, 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048.

М.Н. Булин, Д.Д. Тарасевич

## МИНИ-СЕТИ, МИКРОСЕТИ И АКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ: БУДУЩЕЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Белорусский национальный технический университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены перспективные модели альтернативной организации энергосистемы. Среди наиболее перспективных выделены мини-сети и микросети, выделены основные предпосылки и драйверы их развития. В статье представлены структурные схемы взаимодействия элементов данных систем.

**Ключевые слова:** микросеть, мини-сеть, АЭК, сеть, электроэнергия, альтернативная генерация, перспективные модели энергосистем.

На современном этапе технического развития общества наиболее актуальными глобальными вызовами для энергетической отрасли являются:

- декарбонизация – поэтапный переход от традиционных на возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
- децентрализация – повышение доли малых источников генерации, в т. ч. ВИЭ и накопителей энергии;
- цифровизация – разработка и внедрение в энергетическую отрасль новых бизнес-моделей, сервисов, рынков и подходов на основе передовых цифровых технологий.

По мере постепенного развития современных технологий стоимость электроэнергии, производимой малой генерацией, стремительно снижается и с учётом ценового паритета достигает стоимости электроэнергии на централизованных рынках.

На данный момент наиболее быстро прогрессируют солнечная и ветровая генерация, достаточно уверенно наращиваются мощности малой газовой генерации. Комбинирование всевозможных типов и вариантов энергоснабжения позволяет находить оптимальные решения, ведущие к снижению стоимости электроэнергии для потребителя, а создание локальных малоудалённых от конечного потребителя систем становится весьма выгодным в сравнении с централизованной энергосистемой.

На сегодняшнем этапе развития распределённой генерации наиболее перспективно смотрятся две модели, альтернативные общепринятой централизованной энергосистеме: мини- и микросеть.

Мини-сеть (Mini-grid), как правило, характеризуется использованием в удаленных местах, при отсутствии общей централизованной сети. Мини-сеть зачастую используются в регионах с развивающейся энергетикой, например, странах Африки (среди них Suninbox, Geres, Nayo Tropical, Ensol), а также сельскими либо островными общинами. Таким образом, можно сказать, что мини-сети,



используя распределенные энергетические ресурсы, функционируют аналогично макросети в меньшем масштабе.

В целом, данный подход соответствует определению, сформулированному Всемирным банком: мини-сети — это «часто изолированные небольшие распределительные сети, как правило меньше напряжения 11 киловольт (кВ), которые обеспечивают электроэнергией локальную группу потребителей и вырабатывают электроэнергию из небольших генераторов, потенциально связанных с системой накопления энергии» [1]. Однако следует отметить, что мини-сеть может сохранять связь со внешней энергосистемой при необходимости (рис. 3).

Возобновляемые мини-сети демонстрируют всё больше предпосылок для их развертывания. Многочисленными преимуществами, которые данные энергетические инфраструктуры могут принести ключевым сегментам рынка, являются: гибкость по причине относительно простого строительства в удалённых местах, таких как горная местность, острова, лесистые и холмистые районы, а также возможность оперативного изменения конфигурации в зависимости от изменения состава потребителей и нагрузок; возможность более плотной интеграции с энергосистемой при необходимости; снижение потерь мощности на передачу, обусловленные малой удалённостью от потребителя; надёжность электроснабжения. Структурно области применения мини-сетей можно разделить на четыре группы, представленные на рис. 1.



**Рис. 1. Разновидности мини-сетей по областям применения**

По мере ускорения темпов внедрения мини-сетей крайне важно уделять достаточное внимание производительности, долговечности и адаптивности этих систем к новым разработкам. Необходимостью является применение механизмов обеспечения и поддержания качества за счёт разработки и внедрения особой

инфраструктуры качества (Quality Infrastructure, QI). Драйверы развития QI для сфер применения мини-сетей представлены на рис. 2 [2].

		Доступ к электроэнергии	Снижение стоимости электроэнергии	Бесперебойное снабжение	Энергетическая независимость	Снижение углеродного следа
A1	Удалённые поселения	■	■		■	
	Островные поселения		■	■	■	■
B2	Промышленные и коммерческие зоны		■	■	■	■
	Военная инфраструктура		■	■	■	■
B1	Городские коммунальные службы			■		■
	Университеты и кампусы организаций		■	■		■

Основные драйверы
  Второстепенные драйверы

Рис. 2. Предпосылки внедрения мини-сетей по сферам применения

Структурная схема умных мини-сетей представлена на рис. 3.

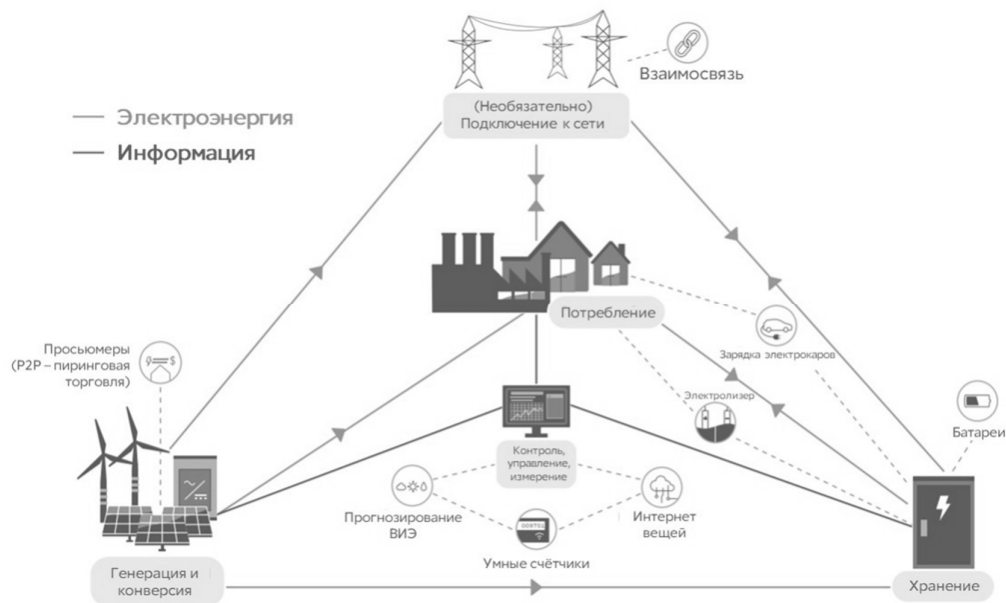


Рис. 3. Схема взаимодействия элементов будущего умной мини-сети

Теперь рассмотрим вторую модель альтернативной системы. Микросеть – локальная энергосистема, для которой, как правило, энергия вырабатывается непосредственно в месте использования и/или частично потребляется из сети для покрытия потребностей небольшой площади. Этот тип локальной энергосистемы может работать автономно от основной энергосистемы, а в случае возникновения аварийных ситуаций предназначается для обеспечения надёжного бесперебойного энергоснабжения потребителей, предъявляющих высокие требования к качеству потребляемой электроэнергии. Микросеть обеспечивает

интерактивные и функциональные отношения между центральной сетью и своими пользователями.

Микросети способны решить задачу удовлетворения спроса потребителей при максимуме пиковых нагрузок, в случае, когда единая сеть не может его покрыть, вдобавок отличительной чертой этого направления является использование ВИЭ, которые с каждым годом показывают уверенный рост по объёмам установленной мощности, увеличивая свое присутствие в энергетических системах стран по всему миру, что связано с удешевлением технологий производства и эксплуатации, а также с появлением эффективных технических средств управления выработкой мощности.

Сегодня создание микросетей является все более и более эффективным решением по энергоснабжению потребителей и значительно укрепляет свои позиции в качестве альтернативы традиционному подходу к развитию энергосистем, базирующимся на создании крупной централизованной генерации и соответствующих электрических сетей [3].

В противовес этому подходу, создание микросетей предполагает наличие источников энергии и энергетической гибкости, которые располагаются как можно ближе к конечному потребителю, а также использование ресурсов гибкости на стороне самих потребителей для достижения оптимального по стоимости, автономности, экологичности, экономичности энергоснабжения.

Под источниками энергетической гибкости в микросетях понимаются любые электроустановки, осуществляющие управляемое техническое воздействие на баланс мощности или баланс электрической энергии в энергосистеме. К этим источникам относятся:

- генерирующее оборудование;
- системы накопления электроэнергии;
- управляемая нагрузка;
- электротехнические средства регулирования перетоков мощности.

Особенно привлекательным решением создание микросетей является для энергоснабжения коммерческих и промышленных потребителей, специализированных кластеров, а также зон с повышенной концентрацией высокотехнологичных производств. **Эти микросети** в совокупности возможностью частичного потребления электроэнергии из единой сети предоставляют своим потребителям эффект понижения расходов на электроэнергию и обеспечивают выполнение всё более часто встречающегося требования к минимизации или полному отсутствию углеродного следа, а также к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии, зачастую более жесткие, чем те, которым удовлетворяет централизованное питание. Первым шагом на пути к созданию крупных промышленных и коммерческих микросетей является разработка и строительство активных энергетических комплексов (АЭК).

Принципиально АЭК является микроэнергосистемой, состоящей из установок собственной генерации, своей внутренней электросетевой инфраструктуры и своего внутреннего промышленного потребителя. Всё это вместе объединено включающей в себя цифровые решения структурой – программно-

аппаратным комплексом, с помощью которого осуществляется регулирование производства и потребления электроэнергии внутри АЭК, а также технологическое взаимодействие единой энергосистемой страны и сети общего пользования. Структура микросети представлена на рис. 4 [4].

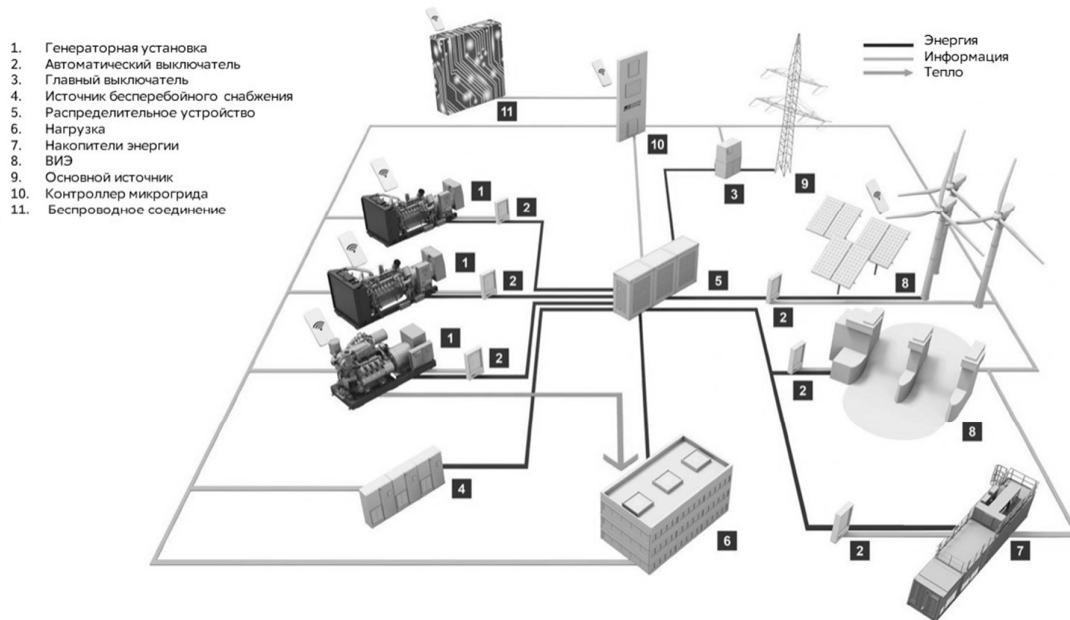


Рис. 4. Структура современной микросети

Объекты АЭК должны соответствовать следующим условиям:

- непосредственно к электрическим сетям макроэнергосистемы подключен только один из объектов АЭК;
- все субъекты АЭК имеют общие электрические связи за счёт объектов электросетевого хозяйства, не состоящие на балансе сетевой организации;
- производство и потребление электрической мощности субъектами АЭК осуществляется с использованием программно-аппаратного комплекса управляемого интеллектуального соединения (ПАК УИС);
- в составе АЭК нет потребителей, относящихся к населению или приравненным к нему категориям потребителей, а также потребителей электрической энергии, ограничение режима потребления которых может привести к экономическим, экологическим, социальным последствиям [5].

Субъекты АЭК самостоятельно определяют ограничения потребления электроэнергии из сети локальной сетевой организации исходя из минимума объема электропотребления с учетом возможностей собственной генерации АЭК и технологических потребностей энергопринимающего оборудования.

Экономическая выгода для членов АЭК достигается за счёт снижения издержек на передачу электроэнергии, превышающей разрешённую мощность. Таким образом это превышение считается полученным от внутреннего поставщика электроэнергии.

По состоянию на начало 2021 г. мировой объём рынка микросети, по подсчётам аналитической организации Guidehouse Insights, оценивался в 8,1 млрд \$

при вводе новых объёмов мощностей в размере 3,5 ГВт в год. По прогнозу к 2028 г. рынок достигнет уровня до 39,4 млрд \$ в год с объёмом ежегодного ввода новых мощностей на уровне 19,9 ГВт.

На данный момент в мире реализуется или разрабатывается порядка 6,6 тыс. проектов микросетей. Активнее всего они создаются в Северной Америке и странах Азиатско-Тихоокеанского региона. Как правило, в микросеть входят разные виды генерации, включая объекты ВИЭ, статические накопители электрической энергии, а также автоматизированные системы учёта и управления. Взаимодействие различных технологий обеспечивает наиболее выгодные уровни потребления и производства электроэнергии. На данном этапе развития вложения в строительство микросетей составляют в 1-3 тыс \$ за 1 кВт установленной мощности и зависят от расположения ячейки, применяемого оборудования, интегратора, вендоров (компания-поставщик (производитель) товаров и услуг под своей торговой маркой). Исследования показывают, что в зарубежных условиях электроснабжение коммерческих предприятий за счёт сочетания солнечной генерации с питанием из сети в среднем дешевле на 40%, чем приобретение электроэнергии сугубо из общей сети. Микросеть в данном случае позволяют упростить процесс коммуникации производителей, поставщиков и потребителей решений для микросети, а также понизить инвестиционные риски и диверсифицировать источники финансирования проектов [6].

Сегодня бурное развитие альтернативной генерации становится всё более и более значимым вызовом для трансформации и модернизации существующей энергосистемы в её привычном понимании. Ряд перспективных концепций, включающих мини- и микросети, АЭК становятся весьма перспективными решениями децентрализации энергосистемы.

Существенным фактором, оказывающим влияние на увеличение спроса на АЭК (микросетей) в будущем, станет развитие секторов экономики с повышенной чувствительностью к качеству электроэнергии и надёжности электроснабжения, таких как дата-центры или центры обработки данных, цифровых производств с использованием современных технологий, производств композиционных материалов, биофармацевтических и других высокоточных и технологичных предприятий. Расходы на снабжение из внешней сети в ряде случаев превышают стоимость владения собственной генерацией в составе АЭК (микросетей).

#### Библиографический список

1. Microgrids, Mini-grids, and Nanogrids: An Emerging Energy Access Solution Ecosystem [Электронный ресурс] // The Energy Access Practitioner Network. – 2017. – Режим доступа: <http://energyaccess.org/news/recent-news/microgrids-mini-grids-and-nanogrids-an-emerging-energy-access-solution-ecosystem/> – Дата доступа: 07.04.2021.
2. Quality infrastructure for smart mini-grids [Электронный ресурс] // IRENA, International Renewable Energy Agency. – 2020. – Режим доступа: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Quality-infrastructure-for-smart-mini-grids> – Дата доступа: 10.04.2021.

3. АЭК. Промышленные микросетки и активные энергетические комплексы (Часть 1) [Электронный ресурс] // MEDIUM. – 2020. – <https://medium.com/internet-of-energy/80b83d88e01d> – Дата доступа: 14.04.2021.
4. Rolls-Royce предлагает на мировой рынок локальные энергосистемы [Электронный ресурс] // Power INC. – 2018. – <http://powerinc.ru/rolls-royce-predlagaet-na-mirovoy-ryinok-lokal/> – Дата доступа: 17.05.2021.
5. Концепция создания и развития активных энергетических комплексов промышленного типа энергосистемы [Электронный ресурс] // НТЦ ЕЭС. – 2020. – <https://активныйэнерго-комплекс.рф/assets/concept.pdf> – Дата доступа: 19.06.2021.
6. АЭК. Промышленные микросетки и активные энергетические комплексы (Часть 3) [Электронный ресурс] // MEDIUM. – 2020. – <https://medium.com/internet-of-energy/63a202f1cac5> – Дата доступа: 16.04.2021.

M. Bulin<sup>1</sup>, D. Tarasevich<sup>1</sup>

## MINI-GRIDS, MICROGRIDS AND ACTIVE ENERGY COMPLEXES: THE FUTURE OF THE ENERGY SYSTEM

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Abstract:** the article considers promising models of alternative organization of the power system. Among the most promising are mini-networks and micro-networks, the main prerequisites and drivers of their development are highlighted. The article presents structural schemes of interaction of elements of these systems.

**Keywords:** micro-grid, mini-network, AEC, network, electricity, alternative generation, promising models of power systems.

### References

- [1] Microgrids, Mini-grids, and Nanogrids: An Emerging Energy Access Solution Ecosystem [Electronic resource] // The Energy Access Practitioner Network. - 2017. - Pre-stupa mode: <http://energyaccess.org/news/recent-news/microgrids-mini-grids-and-nanogrids-an-emerging-energy-access-solution-ecosystem/> - Access date: 07.04.2021.
- [2] Quality infrastructure for smart mini-grid [Electronic resource] // IRINA, International Renewable Energy Agency. - 2020. - Access mode: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Quality-infrastructure-for-smart-mini-grids> -Access date: 10.04.2021.
- [3] AEC. Industrial microgrids and active energy complexes (Part 1) [Electronic resource] // MEDIUM. - 2020. – <https://medium.com/internet-of-energy/80b83d88e01d> -Access date: 14.04.2021 (in Russian)
- [4] Rolls-Royce offers local power systems to the world market [Electronic resource] // Power INC. - 2018. – <http://powerinc.ru/rolls-royce-predlagaet-na-mirovoy-ryinok-lokal/> - Access date: 17.05.2021 (in Russian)
- [5] The concept of creating and developing active energy complexes of an industrial type of power system [Electronic resource] // STC UES. - 2020. – <https://активныйэнергокомплекс.рф/assets/concept.pdf> -Access date: 19.06.2021 (in Russian)
- [6] AEC. Industrial microgrids and active energy complexes (Part 3) [Electronic resource] // MEDIUM. - 2020. – <https://medium.com/internet-of-energy/63a202f1cac5> -Access date: 16.04.2021 (in Russian)

Н. В. Буякова<sup>1</sup>, А. В. Крюков<sup>2,3</sup>, Д. А. Середкин<sup>3</sup>

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В МЕСТАХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Ангарский государственный технический университет<sup>1</sup>  
Иркутский национальный исследовательский технический университет<sup>2</sup>  
Иркутский государственный университет путей сообщения<sup>3</sup>

**Аннотация:** Воздушные и кабельные линии являются источниками электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты. Значения напряженностей линий обычно не превышают допустимые значения для электротехнического персонала. Однако в местах пересечения воздушной и кабельной линий происходит наложение ЭМП, что может приводить к усложнению пространственного распределения поля и увеличению уровней напряженности.

**Ключевые слова:** электромагнитная безопасность, воздушные и кабельные линии электропередачи, электромагнитное поле в местах пересечения, моделирование.

**Введение.** Развитие сетевой инфраструктуры приводит к необходимости организации пересечений высоковольтных линий электропередачи различного конструктивного исполнения. В местах таких пересечений наблюдается усложнение структуры электромагнитного поля (ЭМП) и увеличение напряженностей. Поэтому задача определения условий электромагнитной безопасности [1–12] в местах пересечений ЛЭП имеет несомненную актуальность [13].

**Постановка задачи и методика моделирования.** Рассмотрена ситуация ортогонального пересечения воздушной линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ и кабельной ЛЭП 110 кВ, выполненной из трех одножильных экранированных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет электромагнитных полей (ЭМП) в местах их пересечения осуществлялся с помощью программного комплекса (ПК) Fazonord [14] в четыре этапа:

- 1) расчет режимов работы линий в фазных координатах, по результатам которого определялись потенциалы и токи всех проводов [14];
- 2) вычисление вертикальных и горизонтальных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей для каждой линии;
- 3) определение суммарных составляющих напряженностей в месте пересечения;
- 4) расчет амплитудных значений напряженностей с учетом возможной эллиптической поляризации полей [15].

**Результаты моделирования.** Моделирование ЭМП проводилось для пространства, окружающего место пересечения воздушной линии 220 кВ, выполненной проводами АС-650, и кабельной линии 110 кВ с сечением жил 630 мм<sup>2</sup>. Сечение экрана составляло 95 мм<sup>2</sup>. По каждой фазе воздушной линии (ВЛ) осуществлялся транзит мощности  $50 + j50$  МВ·А, для кабельной линии (КЛ) величина этого параметра была принята равной  $50 + j30$  МВ·А. Для моделирования



КЛ использовался прием, заключающийся в замене жил и экрана наборами тонких проводников с суммарным сечением, равным сечению исходных токоведущих частей. Координаты расположения проводов ВЛ, а также проводников жил и экрана КЛ показаны на рис. 1. Результаты расчета режимов работы ВЛ и КЛ приведены в табл. 1 и 2. На рис. 2 представлены схемы расчетных в ПК Fazonord.

Таблица 1

Модули и фазы напряжений и токов воздушной линии

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	134,9	-2	547,3	-48
В	134,9	-122	550,7	-169
С	134,9	118	550,4	72

Таблица 2

Модули и фазы напряжений и токов кабельной линии

Токосоведущая часть	Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
Жилы	А	64	0	907,8	-30
	В	64	-120	907,9	-120
	С	64	120	907,9	120
Экран	А	0,25	64	48,2	-117
	В	0,25	-56	48,2	122
	С	0,25	-176	48,1	2,6

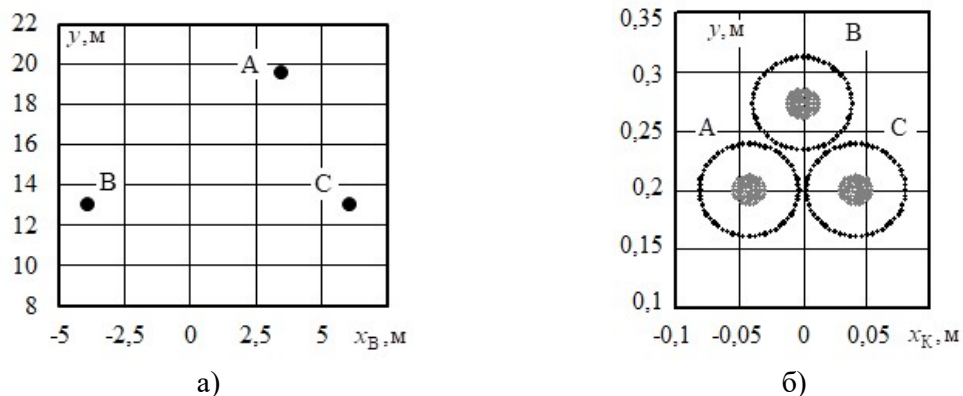


Рис. 1. Расположение токоведущих частей воздушной (а) и кабельной (б) линий

Экранированная кабельная линия не создает заметных уровней напряженности электрического поля, а распределение напряженности магнитного поля в ее сечении при отдельном моделировании ВЛ и КЛ показано на рис. 3. На рис.4 приведено распределение напряженностей электрического и магнитного полей в сечении ВЛ.

Результаты моделирования полей на высоте 1,8 метра в месте пересечения линий представлены на рис. 5, максимальные значения напряженностей сведены в табл. 3. На рис. 6 приведены годографы векторов напряженности в месте пересечения.

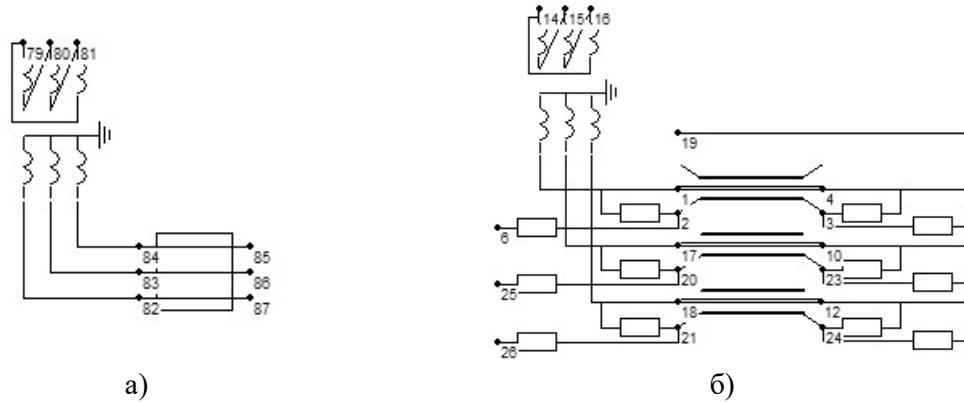


Рис. 2. Фрагменты схем воздушной (а) и кабельной (б) линий в ПК Fazonord

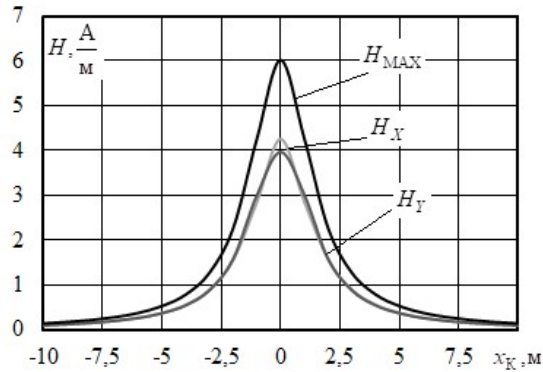
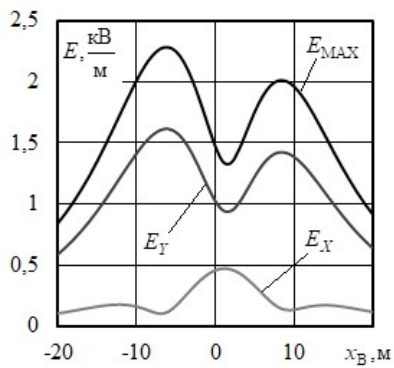
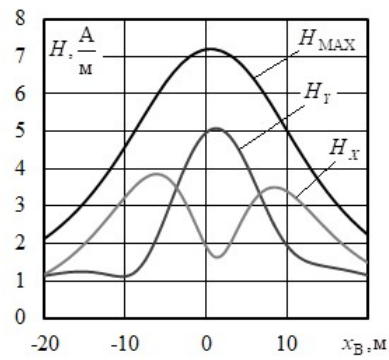


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля кабельной линии



а)



б)

Рис. 4. Распределение напряженности электрического(а) и магнитного(б) полей воздушной линии

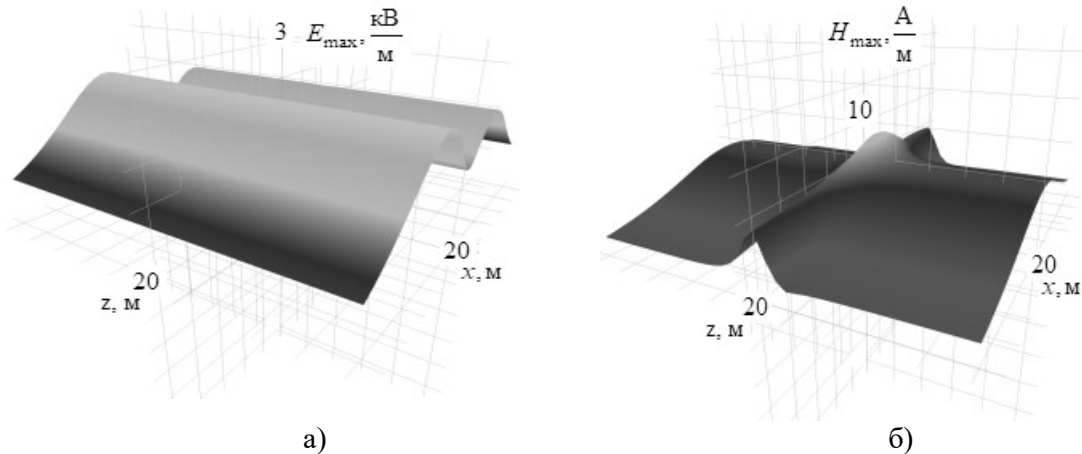


Рис. 5. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения ВЛ и КЛ

Таблица 3  
Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей

Параметр	Воздушная линия 220 кВ	Кабельная линия 110 кВ	Пересечение	Различие, %	
				Между 2 и 4	Между 3 и 4
1	2	3	4	5	6
$E_{max}, \frac{кВ}{м}$	2,28	0,01	2,28	–	227
$H_{max}, \frac{А}{м}$	7,19	6,02	10,6	32	43

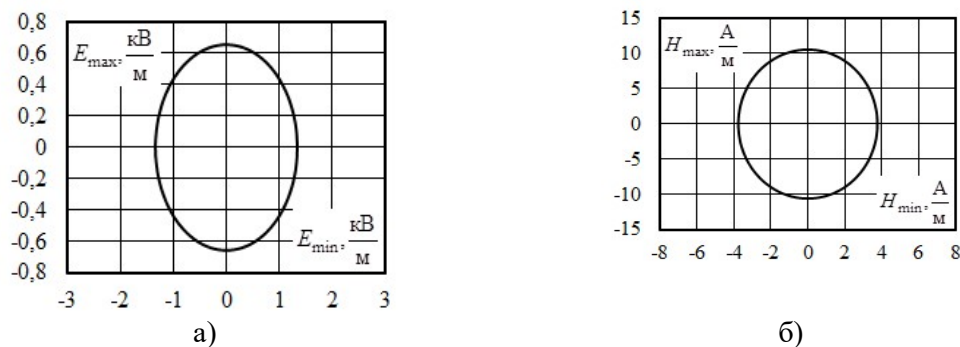


Рис. 6. Годографы напряженностей электрического(а) и магнитного(б) полей в точке с координатами  $x = 1$  м,  $y = 1,8$  м,  $z = -1$  м

**Заключение.** По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Значения напряженности электрического поля кабельной и воздушной линии при раздельном моделировании не превышают предельно допустимых

уровней для электротехнического персонала. Из-за наличия экранов КЛ напряженность электрического поля в месте пересечения определяется только вкладом воздушной линии.

2. В месте пересечения происходит наложение магнитных полей и изменение их пространственной структуры. Напряженности относительно раздельного моделирования ВЛ и КЛ увеличиваются, соответственно, на 32 % и 43 %.

#### Библиографический список

1. **Сидоров, А.И.** Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения / А. И. Сидоров, И.С. Крайневская. - Челябинск, 2008. –204 с.
2. **Косарев, А.Б.** Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения ЖД транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. - М., 2008. – 480 с.
3. **Аполлонский, С. М.** Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях С.М. Аполлонский, Т.В. Каляда. Б. Е. Синдаловский. - СПб, 2006. – 263 с.
4. **Аполлонский, С.М.** Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения / С.М. Аполлонский. - СПб.: Безопасность, 2001. – 620 с.
5. **Аполлонский, С.М.** Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. В 2 тт. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети. / С.М. Аполлонский. - М.: РУСАЙНС, 2017. – 414 с.
6. **Аполлонский, С.М.** Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 тт. Т. 1. Виды физических полей и излучений. Нормативно-правовые документы. / С.М. Аполлонский. - М.: РУСАЙНС, 2016. – 334 с.
7. **Дикой, В.П.** Методы расчета и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты / В.П. Дикой, А.Ю. Токарский, Ю.А. Иостсон, О.В. Красин // Тр. ИГЭУ. – Вып. 4I. – Иваново, 2001. – С. 215-222.
8. **Блейк Левитт, Б.** Защита от электромагнитных полей. О влиянии на организм человека бытовых электроприборов, мобильных телефонов, линий электропередач и других электрических устройств / Б. Блейк Левитт. - М.: АСТ, Астрель, 2007. – 447с.
9. **Вэнс, Э.Ф.** Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели / Э.Ф. Вэнс. - М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.
10. **Рубцова, Н. Б.** Альтернативные варианты обеспечения электромагнитной безопасности линий электропередачи / Н. Б. Рубцова, М. Ш. Мисриханов, В. Н. Седунов, А. Ю. Токарский // Изв. Самарского научного центра РАН. – Т. 14. – № 5(3). – 2012. – С. 839-845.
11. **Закирова, А. Р.** Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей А. Р. Закирова. - Екатеринбург, 2018. – 171 с.
12. **Беляев, Р.Ю.** Мониторинг электромагнитной обстановки линий электропередачи Хакасской энергосистемы / Р.Ю. Беляев, Г.Н. Чистяков // Проблемы энергетики. – № 5-6. – 2009. – С. 60–66.
13. Natalia V. Buyakova, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Seredkin and Le Van Thao. Simulation of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Multicircuit Power Lines. E3S Web of Conferences 209, 07002 (2020). ENERGY-21.
14. **Закарюкин, В.П.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем / Закарюкин В.П., Крюков А.В. - Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. – 273 с.
15. **Буякова, Н.В.** Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков.- Ангарск: АНГТУ, 2018. – 382 с.

N.V. Buyakova<sup>1</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3</sup>, D.A. Seredkin<sup>3</sup>

## ELECTROMAGNETIC FIELDS AT THE INTERSECTION OF AIR AND CABLE LINES

Angarsk State Technical University<sup>1</sup>

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

Irkutsk State Transport University<sup>3</sup>

**Abstract:** Overhead and cable lines are sources of electromagnetic fields (EMF) at industrial frequency. Line strength values are usually not exceeding the permissible values for electrical personnel. However, at the intersection of overhead and cable lines, EMF overlaps, which can lead to a complication of the spatial distribution of the field and an increase in intensity levels.

**Key words:** electromagnetic safety, overhead and cable power lines, electromagnetic field at intersections, modeling.

### References

- [1] Sidorov A. I., Okrainskaya I. S. Electromagnetic fields near ultra-high voltage electrical installations. Chelyabinsk, 2008. 204 p.
- [2] Kosarev A. B., Kosarev B. I. Fundamentals of electromagnetic safety of power supply systems for railway transport. Moscow, 2008. 480 p.
- [3] Apollonskiy S. M., Kalyada T. V., Sindalovskiy B. E. Human life safety in electromagnetic fields. SPb, 2006. 263 p.
- [4] Apollonsky S. M. External electromagnetic fields of electrical equipment and means of their reduction. SPb.: Security, 2001. 620 p.
- [5] Apollonsky S. M. Electromagnetic safety problems on the electrified railway. In 2 vols. T. II. Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network. Moscow, 2017. 414 p.
- [6] Apollonsky S. M. Protecting the technosphere from the effects of physical fields and radiation. In 3 vols. T. 1. Types of physical fields and radiation. Normative legal documents. Moscow, 2016. 334 p.
- [7] Dikoy V. P., Tokarskiy A. Yu., Iostson Yu. A., Krasin O. V. Methods for calculating and measuring ellipsoidal magnetic fields of industrial frequency // Proceedings of Ivanoskgo State Energy University. Issue 4I. Ivanovo, 2001. P. 215-222.
- [8] Blake Levitt B. Protection from electromagnetic fields. On the influence of household electrical appliances, mobile phones, power lines and other electrical devices on the human body. Moscow, 2007. 447 p.
- [9] Vance E.F. Influence of electromagnetic fields on shielded cables M.: Radio i svyaz, 1982. 120 p.
- [10] Alternative options for ensuring electromagnetic safety of power transmission lines / N. B. Rubtsova, M. Sh. Misrikhanov, V. N. Sedunov, A. Yu. Tokarsky // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. T. 14. No. 5 (3). 2012. P. 839-845.
- [11] Zakirova A. R/ Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields. Yekaterinburg, 2018. 171 p.
- [12] Belyaev R. Yu., Chistyakov G. N. Monitoring of the electromagnetic environment of the power transmission lines of the Khakass power system // Problems of power engineering. No. 5-6. 2009. S. 60–66.
- [13] Natalia V. Buyakova, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Seredkin and Le Van Thao. Simulation of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Multicircuit Power Lines. E3S Web of Conferences 209, 07002 (2020). ENERGY-21.
- [14] Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complexly asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
- [15] Buyakova N. V., Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Electromagnetic safety in railroad power supply systems: modeling and control. Angarsk, 2018. 382 p.

А.А. Варга, Г.В. Шведов

## ВЛИЯНИЕ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ 6-10 кВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Аннотация:** В статье рассмотрено влияние неравномерности загрузки трансформаторов трансформаторных подстанций типовой городской распределительной сети номинальным напряжением 6 кВ на потери электроэнергии в ней. На основании полученных результатов делается вывод о величине погрешности в определении потерь электроэнергии при принятии допущения о равномерности загрузки сети.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, потери электроэнергии, метод средних нагрузок, РАП-10-ст, погрешность определения нагрузочных потерь, неравномерность загрузки трансформаторов.

При передаче электрической энергии от источника к потребителям часть ее расходуется на процессы, необходимые для ее транспортировки [1]. Это количество электроэнергии принято называть потерями электроэнергии. Существует ряд факторов, который влияет на уровень потерь электроэнергии в сети [2]. Одним из таких факторов, наряду с температурой окружающей среды, качеством электроэнергии, топологией сети, является загрузка используемого оборудования.

В сетях номинальным напряжением 6-10 кВ низкая обеспеченность средствами автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) [3], а значит низкий уровень контроля загрузки оборудования во времени. В большинстве случаев оказывается известен только суммарный отпуск электроэнергии в сеть за период времени [4], а значения загрузки отдельных трансформаторов трансформаторных подстанций (ТП) этой сети остаются неизвестными. В таких условиях потери электроэнергии считают методом средних нагрузок, принимая допущение о том, что все трансформаторы ТП загружены одинаково, пропорционально известному отпуску электроэнергии в сеть.

Согласно методу средних нагрузок, потери электроэнергии за расчетный интервал  $T$  определяют по формуле [5]:

$$\Delta W_{\text{н}} = k_{\text{л}} \cdot k_{\text{к}} \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot T \cdot k_{\text{ф}}^2, \quad (1)$$

где  $k_{\text{л}}$  – коэффициент, учитывающий влияние потерь в арматуре воздушных линий (ВЛ) и принимаемый равным 1,0 для линий номинальным напряжением до 110 кВ и 1,02 для линий номинальным напряжением 110 кВ и выше;  $k_{\text{к}}$  – коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и

реактивной нагрузки различных ветвей сети и равный 0,99;  $\Delta P_{cp}$  – потери активной мощности в сети при средних за расчетный интервал нагрузках узлов;  $k_{\phi}^2$  – коэффициент формы графика нагрузки за расчетный интервал  $T$ .

Исследования влияния неравномерности загрузки трансформаторов ТП проводилось на примере фрагмента типовой городской распределительной сети номинальным напряжением 6 кВ (рис. 1). Она состоит из четырех ТП с трансформаторами ТМГ-630/6 на каждой и кабелями ААБ 3×185 (600 м), ААШв 3×150 (750 м), ААШв 2×95 (550 м), ААШв 3×70 (400 м) на головном и остальных участках соответственно.

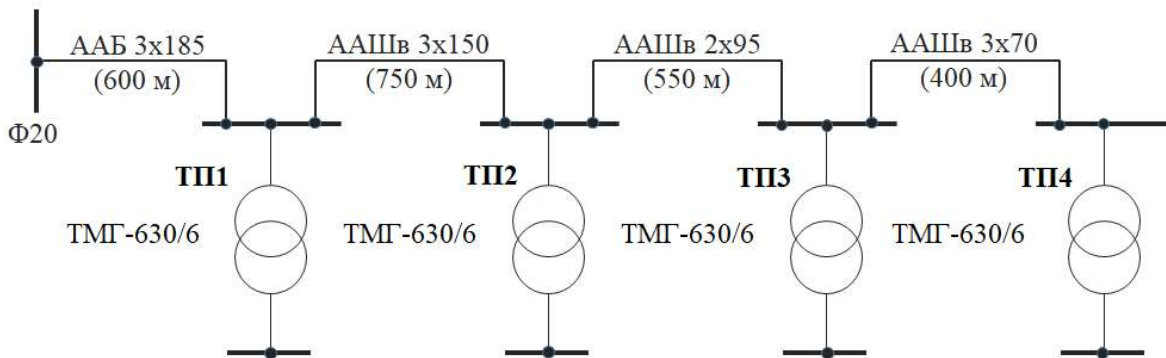


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой сети

Моделирование и расчет потерь электроэнергии выполнялся в программе РАП-10-ст [6]. В первую очередь в этой программе были смоделированы потери электроэнергии в исходном режиме, соответствующем равномерной загрузке трансформаторов. В качестве параметров исходного режима были взяты:

- отпуск электроэнергии в сеть за месяц, равный 1200 тыс. кВт · ч;
- квадрат коэффициента формы суточного графика нагрузки (принимается, что графики всех суток месяца одинаковые), равный 1,02.

Таблица 1

Потери электроэнергии при равномерной загрузке трансформаторов ТП, тыс. кВтч

Нагрузочные			Холостого хода			суммарные
в линиях	в тр-рах	суммарные	в линиях	в тр-рах	суммарные	
14,241	10,264	24,505	0,12	5,139	5,259	29,764

В результате моделирования исходного режима были получены потери электроэнергии (табл.1), а также выяснено, что при принятии допущения о равенстве коэффициентов загрузки трансформаторов ТП при заданном отпуске электроэнергии в сеть коэффициент загрузки трансформаторов всех ТП составил 0,72. Следовательно для обеспечения идентичного отпуска электроэнергии в

сеть во всех режимах при варьировании коэффициента загрузки трансформаторов сумма коэффициентов загрузки всех четырех трансформаторов рассматриваемой сети должна оставаться неизменной и быть равной 2,88 ( $0,72 \times 4$ ).

Чтобы составить корректный массив коэффициентов загрузки трансформаторов для моделирования потерь при неравномерной загрузке в РАП-10-ст, были сформулированы следующие требования:

- 1) значения коэффициентов загрузки трансформаторов должны быть в диапазоне от 0 до 1,4 (по условию допустимых перегрузок в аварийном режиме);
- 2) сумма коэффициентов загрузки трансформаторов сети должна быть равна 2,88 для каждого создаваемого режима;
- 3) охватить все возможные значения суммы квадратов коэффициентов загрузки трансформаторов ТП с учетом технических ограничений по загрузке трансформаторов и точности задания коэффициентов в программе РАП-10-ст без повторов;
- 4) добиться, чтобы в совокупности всех режимов каждый трансформатор сети был загружен одинаково и имел примерно одинаковый средний разброс коэффициентов загрузки относительно среднего значения.

Введение условия №3 основывается на следующей формуле [7]:

$$\Delta S_{T\Sigma} = S_{\text{ном.т}}^2 \cdot Z_T \cdot \left( \frac{k_{31}^2}{U_1^2} + \frac{k_{32}^2}{U_2^2} + \frac{k_{33}^2}{U_3^2} + \frac{k_{34}^2}{U_4^2} \right), \quad (2)$$

где  $S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность трансформаторов сети;  $Z_T$  – полное сопротивление продольной ветви схемы замещения трансформатора;  $k_{31} \div k_{34}$  – коэффициенты загрузки трансформаторов сети;  $U_1 \div U_4$  – напряжение на стороне высшего напряжения трансформаторов.

Из формулы (2) видно, что суммарные нагрузочные потери мощности в трансформаторах сети пропорциональны сумме квадратов их коэффициентов загрузки, а значит, чтобы охватить все возможные режимы потерь электроэнергии в трансформаторах необходимо ввести условие №3.

Несложно доказать, что выражение (2) (при равенстве напряжений на стороне высшего напряжения трансформаторов) будет принимать минимальное значение при условии:  $k_{31} = k_{32} = k_{33} = k_{34}$  (режим равномерной загрузки трансформаторов ТП) [8]. Таким образом, левая граница интервала сумм квадратов коэффициентов загрузки ТП рассматриваемой сети будет равна (с учетом точности 0,01 задания коэффициентов загрузки в программе РАП-10-ст):

$$\sum k_{3\text{лев}}^2 = 4 \cdot k_{3\text{равн}}^2 + 0,01 = 4 \cdot 0,72^2 + 0,01 = 2,08, \quad (3)$$

где  $k_{3\text{равн}}^2$  – квадрат коэффициента загрузки при равномерной загрузке трансформаторов ТП рассматриваемой сети.

Правую границу интервала сумм квадратов коэффициентов загрузки ТП рассматриваемой сети определим при условии, что два трансформатора загружены максимально возможно по условиям технических ограничений при аварийных перегрузках ( $k_3 = 1,4$ ), один трансформатор отключен ( $k_3 = 0$ ), а коэффициент загрузки оставшегося равен:

$$k_3 = 2,88 - 1,4 - 1,4 - 0 = 0,08 \quad (4)$$



$$\sum k_{з\text{прав}}^2 = 2 \cdot k_{з\text{.макс возм.}}^2 + 0,08^2 = 2 \cdot 1,4^2 + 0,08^2 = 3,93, \quad (5)$$

где  $k_{з\text{.макс возм.}}$  - квадрат максимально возможного коэффициента загрузки трансформаторов ТП по условиям технических ограничений при аварийных перегрузках.

Таким образом, коэффициенты загрузки ТП необходимо подобрать так, чтобы суммы их квадратов охватили все значения от 2,08 до 3,93 с шагом в 0,01. В итоге в сформированном массиве окажется 186 наборов коэффициентов загрузки.

Обеспечение одинаковых средних значений коэффициентов загрузки трансформаторов каждой ТП сети и их средних разбросов относительно этих значений необходимо для того, чтобы обеспечить равномерность распределения мощности головного участка сети по кабельным линиям в совокупности всех режимов. Для этого необходимо определить матожидание и среднеквадратическое отклонение коэффициентов загрузки трансформаторов ТП. Вычислив их, а затем выровняв матожидания и вычислив дисперсии, массив коэффициентов был выровнен по значениям дисперсий. После нескольких итераций были получены статистические характеристики распределения коэффициентов загрузки трансформаторов ТП (табл. 2).

Таблица 2

Статистические характеристики распределения коэффициентов загрузки трансформаторов каждой ТП

$Mk_з$				$\sigma k_з$			
ТП1	ТП2	ТП3	ТП4	ТП1	ТП2	ТП3	ТП4
0,72	0,72	0,72	0,72	0,53	0,39	0,43	0,56

Полученные режимы загрузки трансформаторов сети были промоделированы и проанализированы. Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 2 в виде разности в процентах потерь электроэнергии при неравномерной загрузке трансформаторов и равномерной.

Таблица 3

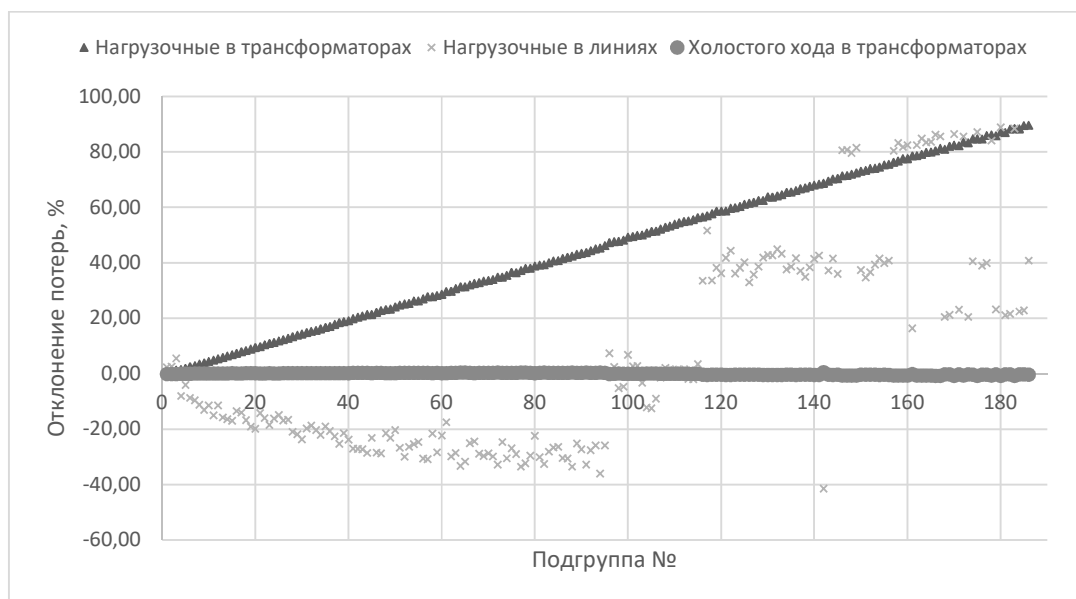
Характеристики разброса отклонений потерь электроэнергии, %

Хар-ка	Нагрузочные			Холостого хода			суммарные
	в линиях	в тр-рах	суммарные	в линиях	в тр-рах	суммарные	
макс	88,88	89,68	88,49	0	0,62	0,61	72,74
мин	-41,44	0,16	-7,72	0	-0,68	-0,67	-6,31

Как видно из рис. 2, повторяющихся значений нагрузочных потерь электроэнергии в трансформаторах нет, что подтверждает тезис о том, что они пропорциональны сумме квадратов их коэффициентов загрузки и не зависят от их порядка. Из табл. 3 видно, что их минимальное значение положительное и

больше нуля, что говорит о том, что потери электроэнергии в трансформаторах занижаются при неучете неравномерности загрузки трансформаторов ТП.

Как видно из рис. 2 и табл. 3, нагрузочные потери электроэнергии в кабельных линиях при неравномерной загрузке трансформаторов ТП могут быть как больше нагрузочных потерь электроэнергии при их равномерной загрузке, так и меньше (об этом говорят знаки значений в табл. 3).



**Рис. 2. Отклонение потерь электроэнергии при неравномерной загрузке трансформаторов от потерь электроэнергии при их равномерной загрузке**

Сумма потерь электроэнергии в линиях зависит от распределения нагрузки головного участка по остальным. Изменение загрузки трансформаторов не влияет на нагрузочные потери электроэнергии головного участка сети, поскольку суммарная мощность сети не меняется. Чем больше будут загружены первые ТП, тем меньше будут потери на всех последующих участках сети после головного.

Потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах при неравномерной загрузке трансформаторов ТП могут быть как больше аналогичных потерь электроэнергии при их равномерной загрузке, так и меньше. Это объясняется падениями напряжения в сети. Чем больше будут загружены первые ТП, тем меньше будут потери на всех последующих участках сети после головного и тем больше будут потери холостого хода в трансформаторах ТП и наоборот. Но при этом слабый разброс значений отклонений (от -0,60 до 0,58%) свидетельствует о том, что неравномерность загрузки трансформаторов слабо влияет на потери напряжения в сети и их влиянием на суммарные потери электроэнергии в сети можно пренебречь.

Таким образом, неучет неравномерности загрузки трансформаторов ТП приводит к появлению погрешности расчета потерь электроэнергии, которая только по итогам данного расчета может достигать 90%. При этом, в отличие от остальных видов потерь электроэнергии, неучет неравномерности загрузки трансформаторов однозначно приводит к занижению расчетных нагрузочных потерь электроэнергии в трансформаторах.

## Библиографический список

1. **Шведов, Г.В.** Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение: учебное пособие Г.В. Шведов, О.В. Сипачева, О.В. Савченко. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 424 с.
2. **Садыкова, Ф.М.** Анализ потерь электрической энергии и пути их снижения в городских электрических сетях г. Махачкалы. Нормирование технологических потерь электрической энергии // Системные технологии, №12, 2014, С. 1–6.
3. **Кошкин, А.А.** АИИС КУЭ ОАО «ЕЭСКЭ» – история совершенствования системы учета / А.А. Кошкин // Электроэнергия. Передача и распределение №3 (6), май-июнь, 2011, С.54–58.
4. **Железко, Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. - М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
5. **Пономаренко, О.И.** Расчёт технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях 6 – 10/0,4 кВ на среднесрочных интервалах времени / О.И. Пономаренко, С.Н. Редин, О.В. Дичина // М.: ЭНЕРГЕТИК, №4, 2016, С.3–8.
6. РАП-Стандарт: программный комплекс для расчета, анализа и нормирования потерь электроэнергии в сетях всех напряжений энергоснабжающих организаций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rap-standart.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
7. **Пузырева Е.В.** Анализ потерь электроэнергии в распределительных сетях. В сборнике: Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов./ Е.В. Пузырева // Сборник трудов восьмой международной научно-технической конференции. отв. ред. Н.В. Савина. 2015. С. 123–126.
8. **Туганбаев, А.А.** Высшая математика. Функции многих переменных, двойные и тройные интегралы: учебник / А.А. Туганбаев. - М.: Флинта, 2019. – 228 с.

A.A. Varga, G.V. Shvedov

## INFLUENCE OF TRANSFORMER LOADING ON POWER LOSSES IN THE 6-10 kV GRID

National research university “MPEI”

**Abstract:** The article considers the influence of uneven loading of transformers of transformer substations of a typical urban distribution network with a nominal voltage of 6 kV on the loss of electricity in it. On the basis of the obtained results, a conclusion is made about the amount of error in determining the power losses when making the assumption about the uniformity of the network load.

**Key words:** distribution network, power losses, method of average loads, RAP-10-st, error in determining load losses, unevenness of transformer loading.

### References

- [1] G.V. Shvedov, O.V. Sipacheva, O.V. Savchenko. “Poteri elektroenergii pri ee transporte po elektricheskim setyam: raschet, analiz, normirovanie i snizhenie: uchebnoe posobie [Losses of electricity during its transport through electric networks: calculation, analysis, rationing and reduction: a textbook.]”. M.: Izdatel'skij dom MEI [Moscow, publishing house of MPEI], 2013. – 424 p (in Russian).
- [2] F.M Sadykova. “Analiz poter' elektricheskoy energii i puti ih snizheniya v gorodskih elektricheskikh setyah g. Mahachkaly. Normirovanie tekhnologicheskikh poter' elektricheskoy energii [Analysis of electric energy losses and ways to reduce them in the urban electric networks of Makhachkala. Rationing of technological losses of electric energy]”// “Sistemnye tekhnologii [System Technologies]”, №12, 2014, pp. 1–6 (in Russian).
- [3] A.A. Koshkin. “AIIS KUE OAO “EESKE” – istoriya sovershenstvovaniya sistemy ucheta [AIMS ERA (automated information and measurement system for energy resources accounting) PTE LTD () “YEGC (Yekaterinburg Electric Grid Company)” – history of improving the accounting system]” // “Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]” №3 (6), “maj-iyun' [may - june], 2011, pp.54–58 (in Russian).
- [4] YU.S. ZHelezko. “Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Loss of electricity. Reactive power. Electricity quality: A guide for practical calculations]”. M.: ENAS, 2009. – 456 p. (in Russian).
- [5] O.I. Ponomarenko, S.N. Redin, O.V. Dichina “Raschyot tekhnologicheskikh poter' elektroenergii v raspredelitel'nyh setyah 6 – 10/0,4 kV na srednesrochnyh intervalah vremeni [Calculation of technological losses of electric power in distribution networks of 6-10/0. 4 kV at medium-term time intervals]”// M.: ENERGETIK, №4, 2016, pp. 3–8 (in Russian).
- [6] RAP-Standard: a software package for calculating, analyzing and normalizing electricity losses in the networks of all voltages of power supply organizations [Electronic resource]. - Access mode: <http://rap-standart.ru>, free. - Title from the screen.
- [7] E.V. Puzyreva. “Analiz poter' jelektroenergii v raspredelitel'nyh setyah. V sbornike: Jenergetika: upravlenie, kachestvo i jeffektivnost' ispol'zovaniya jenergoresursov. [Analysis of electricity losses in distribution networks. In: Energy: Management, quality and efficiency of energy resources use]” // “Sbornik trudov vos'moj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. [Proceedings of the Eighth International Scientific and Technical Conference]” otv. red. N.V. Savina. 2015. pp. 123–126. (in Russian).
- [8] A.A. Tuganbaev. “Vysshaja matematika. Funkcii mnogih peremennyh, dvojnye i trojnye integraly: uchebnik. M.: Flinta, [Higher mathematics. Functions of many variables, double and triple integrals, textbook Flint]” 2019. – 228 p.

**И.П. Карпов****УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ АПВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПИТАЮЩЕЙ  
ЛИНИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению      До-  
рожная электротехническая лаборатория

**Аннотация:** В статье представлено устройство контроля короткого замыкания с распознаванием проходящего или устойчивого короткого замыкания для управления автоматическим повторным включением выключателя питающей линии контактной сети переменного тока двухпутного участка. Предложенное устройство относится к системе автоматизации тягового электроснабжения железных дорог. Устройство повышает надежность тягового электроснабжения при бстродействующем АПВ питающей линии контактной сети путем исключения ложных отключений выключателя.

**Ключевые слова:** автоматизация тягового электроснабжения, контроль короткого замыкания, наведенное напряжение, повторное включение.

**Устройства контроля короткого замыкания**

Устройства контроля короткого замыкания (УККЗ) с распознаванием проходящего или устойчивого короткого замыкания (КЗ) рассмотрены в [1]. Далее рассмотрим в тяговой сети переменного тока системы 25 кВ пост секционирования на разъединителях.

Известно устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока [2], принимаемое за прототип, в соответствии с которым: УККЗ в контактной сети переменного тока двухпутного участка с бстродействующим АПВ (БАПВ) выключателя питающей линии контактной сети первого пути с трансформатором остаточного напряжения (ТН), содержащее контактную сеть, подключенную через выключатели к шинам тяговых подстанций, пост секционирования на разъединителях, фильтр высших гармонических составляющих остаточного напряжения, вход которого подключен к вторичной обмотке ТН контактной сети через замыкающий с задержкой контакт реле запуска, фильтр низкой частоты (ФНЧ) с областью пропускания 0-48 Гц, усилитель и выходное реле, при этом вход ФНЧ подключен к выходу фильтра высших гармонических составляющих остаточного напряжения, а выход ФНЧ – к входу усилителя, который в свою очередь подсоединен к входу выходного реле.

Это устройство работает в тяговой сети переменного тока с постом секционирования на разъединителях и при КЗ в тяговой сети отключаются неселективно все четыре выключателя питающих линий контактной сети двух тяговых подстанций. При успешном БАПВ выключателя питающей линии первого пути, оснащённой ТН, этот выключатель питает всю межподстанционную зону, так как пост секционирования остается включенным 1-2 сек [1].

Недостатки прототипа устройства [2]: возможность ложного отключения выключателя питающей линии после успешного быстрогодействующего БАПВ в связи с включением большой тяговой нагрузки всей межподстанционной зоны.

### Раскрытие изобретения

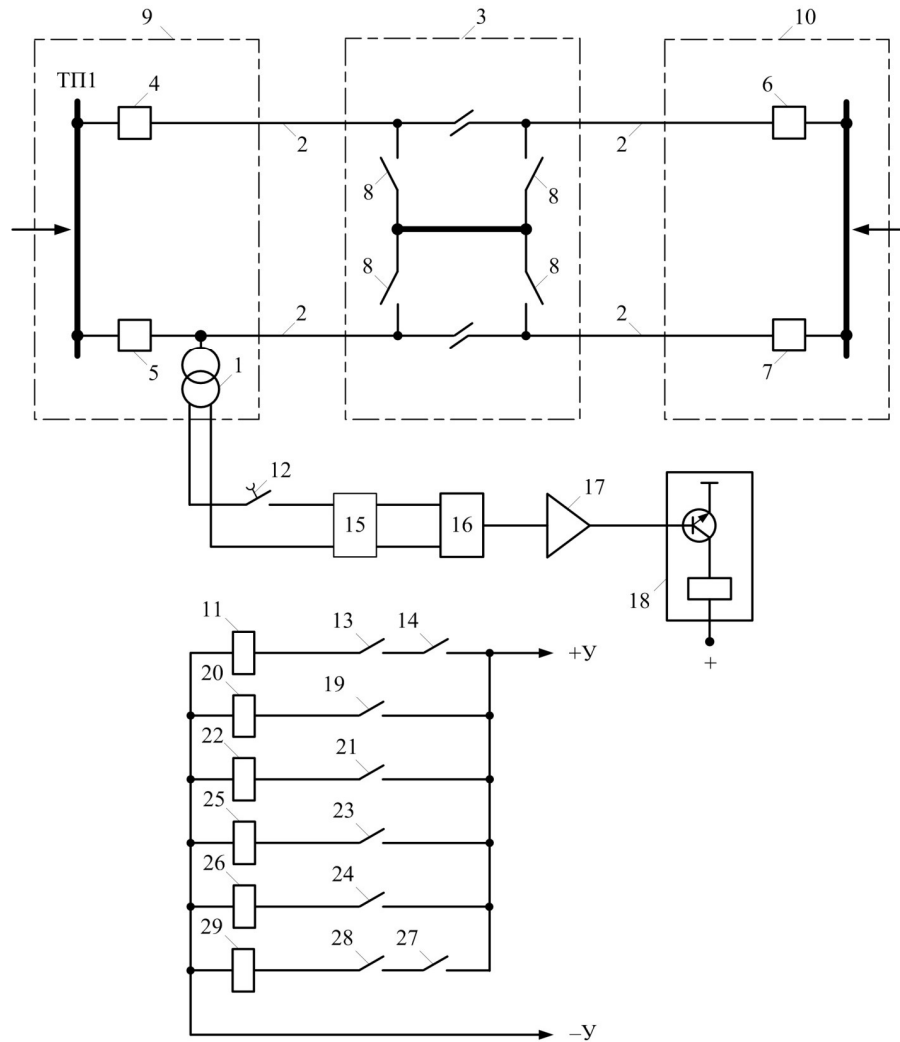
Цель изобретения – повышение надежности тягового электроснабжения при быстродействующем БАПВ питающей линии контактной сети путем исключения ложных отключений выключателя.

Для реализации цели изобретения после успешного включения выключателя от быстродействующего БАПВ подается команда на включение другого (смежного) выключателя питающей линии контактной сети второго пути. Таким образом, вся нагрузка межподстанционной зоны распределяется уже на два выключателя и в этом случае нет опасности ложного отключения выключателя питающей линии контактной сети первого пути от больших токов тяговой нагрузки.

Таким образом, обеспечивается следующий технический результат: в случае успешного быстродействующего БАПВ выключателя питающей линии питания межподстанционной зоны осуществляется уже двумя выключателями питающих линий первого и второго путей.

Итак, для реализации поставленной цели в устройство, содержащее выходное реле, реле запуска, ТН, фильтр высших гармонических, фильтр низкой частоты (ФНЧ) остаточного напряжения и усилитель, вводится цепочка из двух последовательно соединенных замыкающих контактов реле повторителя отключенного положения выключателя первого пути и реле фиксации команды включения выключателя первого пути, реле времени, первое и второе промежуточные реле, реле фиксации команды включения выключателя второго пути и две катушки включения выключателей соответственно первого и второго путей. При этом цепочка из двух последовательно соединенных контактов реле подключена одним концом к «+» шине, а другим – к первому входу катушки реле запуска, второй вход которой подключен к «-» шине, катушка реле времени первым выводом подключается к «+» шине через замыкающий контакт выходного реле, а вторым выводом – к «-» шине. Замыкающий контакт реле времени одним выводом подключается к «-» шине, а вторым – к первому входу катушки первого промежуточного реле, второй вход которой подключен к «-» шине. Первый и второй замыкающие контакты первого промежуточного реле одними из выводов подключаются к «+» шине и подают «+» оперативного напряжение на первый вход катушки включения выключателя первого пути и на первый вход катушки второго промежуточного реле, вторые входы которых подключены к «-» шине. Цепочка из последовательно соединенных замыкающего контакта второго промежуточного реле и замыкающего контакта реле фиксации команды включения выключателя второго пути подключается одним концом к «+» шине, а другим – к первому входу катушки включения выключателя второго пути, второй выход которой подключен к «-» шине.

Схема предлагаемого УККЗ управления АПВ представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема УККЗ в контактной сети переменного тока двухпутного участка с БАПВ выключателя питающей линии:**

1 – трансформатор остаточного напряжения; 2 – контактная сеть переменного тока 25 кВ; 3 – пост секционирования на разъединителях; 4 – выключатель питающей линии контактной сети второго пути; 5 – выключатель питающей линии контактной сети первого пути; 6, 7 – выключатели питающих линии контактной сети смежной подстанции; 8 – разъединители питающих линии контактной сети на посту секционирования; 9, 10 – смежные тяговые подстанции; 11 – катушка реле запуска с замыкающим с задержкой контактом 12; 13 – замыкающий контакт реле повторителя отключенного положения выключателя 5; 14 – замыкающий контакт реле фиксации команды включения выключателя 5 питающей линии первого пути; 15 – фильтр высших гармонических составляющих остаточного напряжения; 16 – фильтр низкой частоты (ФНЧ) остаточного напряжения с зоной пропускания 0-48 Гц; 17 – усилитель; 18 – выходное реле; 19 – замыкающий контакт выходного реле; 20 – катушка реле времени; 21 – замыкающий контакт реле времени; 22 – катушка первого промежуточного реле; 23, 24 – замыкающие контакты первого промежуточного реле; 25 – катушка включения выключателя питающей линии первого пути; 26 – катушка второго промежуточного реле с замедлением; 27 – замыкающий контакт второго промежуточного реле; 28 – замыкающий контакт реле фиксации команды включения выключателя 4 питающей линии второго пути; 29 – катушка включения выключателя питающей линии второго пути.

### Принцип работы устройства управления АПВ

Устройство работает следующим образом. После отключения выключателей 4-7 в контактную сеть генерируется остаточное напряжение [1,3] от фазорасщепителей электроподвижного состава (например, ВЛ80с и ЭР9) оснащенного трехфазными асинхронными двигателями для питания собственных нужд. При проходящем коротком замыкании (при КЗ самоустраняющимся после отключения выключателей 4-7) частота остаточного напряжения снижается и через 0,5-1 с становится 47-45 Гц. Величина остаточного напряжения при этом составляет 2-8 кВ и спадает до нуля за время 1-3 с, по мере торможения фазорасщепителей.

При устойчивом КЗ остаточное напряжение близко к нулю.

В случае аварийного отключения выключателей 4-7, например, от устройств защиты контакт реле фиксации команды включения 14 выключателя 5 остается в замкнутом положении. При этом контакт реле повторителя 13 отключенного положения выключателя 5 замыкается, что приводит к несоответствию между положениями выключателя 5 и реле фиксации 14. Последнее используется для запуска БАПВ, а именно приводит к замыканию цепи питания катушки реле запуска 11 только при аварийном отключении выключателя 5. В результате замыкается контакт 12 реле запуска 11 и напряжение от трансформатора остаточного напряжения 1 поступает на фильтр 15, где отфильтровываются высшие гармонические остаточного напряжения. На выходе фильтра 16 ФНЧ с зоной пропускания 0-48 Гц появляется остаточное напряжение, что свидетельствует об отсутствии КЗ в контактной сети, которое подается на вход усилителя 17, что приводит к подаче напряжения на катушку выходного реле 18 и срабатыванию его замыкающего контакта 19, который подает напряжение на катушку реле времени 20. Уставка реле времени обычно выбирается равной 0,3 - 0,5 с в соответствии с Руководством по эксплуатации интеллектуального терминала выключателя питающей линии первого пути. После срабатывания реле времени его замыкающий контакт 21 подает питание на катушку первого промежуточного реле 22, которое своим замыкающим контактом 23 приводит к замыканию цепи питания катушки включения 25 выключателя питающей линии первого пути, обеспечивая включение выключателя 5.

Одновременно с замыканием первого замыкающего контакта 23 срабатывает второй замыкающий контакт 24, который подает напряжение на катушку второго промежуточного реле 26. В результате замыкается контакт 27 промежуточного реле 26 и при замкнутом контакте 28 реле фиксации команды включения выключателя 4, выполняется замыкание цепи питания катушки включения 29 выключателя 4 питающей линии смежного пути, обеспечивая его включение. В рассматриваемом случае реле фиксации команды включения выключателя 4 находится в замкнутом положении только при аварийном отключении выключателя 4.



### Выводы

1. Функционирование описанного устройства управления АПВ не зависит от тяговой нагрузки на межподстанционной зоне.
2. УККЗ обеспечивает необходимую чувствительность для контроля устойчивого КЗ.
3. Внедрение предложенного устройства увеличит надёжность функционирования системы тягового электроснабжения переменного тока.

### Библиографический список

1. **Герман, Л.А.** Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. / Л.А. Герман, В.Л. Герман. - Монография. М:МГУПС, 2014.
2. Патент на изобретение № №2316779 от 12.12.2005. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока. (Герман Л.А., Герман В.Л., Марков А.Ю.). Оpubл. 10.02.2008 Бюлл. №4.
3. **Герман, Л.А.** Исследование электромагнитных процессов в тяговой сети 25 кВ после отключения токов короткого замыкания / Л.А. Герман, А.Ю. Марков. - Межвуз. Сб. науч. тр. РГОТУПС. М. РГОТУПС 2004 г.
4. Патент на изобретение № 2531025 от 07.09.2012 Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дороги (Герман Л.А., Герман В.Л., Жевлаков Д.А., Попов А.Ю.). Оpubл. 20.10.2014, бюлл. №8.

---

I.P. Karpov<sup>1</sup>

## AC CONTROL DEVICE OF THE SUPPLY LINE CIRCUIT BREAKER

Branch of JSC "Russian Railways" Transenergo Gorky Directorate for Power Supply Road Electro-technical Laboratory<sup>1</sup>

**Abstract:** The article presents a short-circuit monitoring device with the recognition of a passing or stable short-circuit to control the automatic re-activation of the switch of the supply line of the AC contact network of the two-track section. The proposed device relates to the system of automation of traction power supply of railways. The device increases the reliability of the traction power supply with a quick automatic re-activation of the supply line of the contact network by eliminating false disconnections of the switch..

**Key words:** automation of traction power supply, short circuit control, induced voltage, re-switching.

### References

1. L.A. Herman, V.L. Herman, "Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka [Automation of AC traction power supply]", Moscow: MGUPS, 2014.
2. L.A. Herman, A.Yu. Markov, "Issledovaniye elektromagnitnykh protsessov v tyagovoy seti 25 kV posle otklyucheniya tokov korotkogo замыканиya [Investigation of electromagnetic processes in a 25 kV traction network after short-circuit currents are disconnected. Interuniversity]" Sat. scientific. tr. RGOTUPS. M., RGOTUPS, 2004 г.

А.А. Кралин, А.А. Асабин, Р.Ш. Бедретдинов, Е.В. Крюков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию процесса перераспределения потоков мощности в распределительной электрической сети (РЭС) с тиристорным регулятором напряжения (ТРН). ТРН предназначен для регулирования потоков мощности и стабилизации напряжения в электрической сети среднего напряжения 6-20 кВ. Проанализированы проблемы в электрической сети 6-20 кВ и определены пути их решения. Рассмотрены особенности работы ТРН, его технические характеристики. Разработана имитационная модель РЭС с ТРН, на основе которой проведены исследования потокораспределения участка электрической сети.

**Ключевые слова:** тиристорный регулятор напряжения, потоки мощности, распределительная электрическая сеть.

### Введение

Одной из актуальных задач современной электроэнергетики является разработка устройств регулирования параметров электроэнергии, позволяющих, в частности, регулировать потоки электрической мощности. Такие устройства находят применения в сетях высокого и среднего напряжения. Распределительные сети среднего напряжения характеризуются неравномерной загрузкой линий электропередач, высокими потерями электрической энергии, а в ряде случаев существенным отклонением напряжения от значений, определяемых ГОСТ 32144-2013. В петлевых и кольцевых схемах с многосторонним питанием возникают перетоки мощности, вызывающие неоптимальное распределение потоков энергии в РЭС. Указанные проблемы могут быть решены путем замены электрооборудования на более мощное, увеличением сечения линий электропередачи, переходом на более высокий класс напряжения, что не всегда целесообразно. Одним из путей решения ряда указанных проблем является внедрение технологий FACTS (flexible alternative current transmission systems). Технологии FACTS позволяют перейти от электрической сети с «пассивной» структурой передачи электрической энергии к «активной», реализующей функции управления режимами работы. Управление режимами работы сети осуществляется с использованием устройств силовой электроники, регулирующих параметры электроэнергии.

Одним из таких устройств является трехфазный тиристорный регулятор напряжения (ТРН). Упрощенная схема ТРН приведена на рис. 1.

Принцип действия ТРН основан на совместном использовании продольного (изменение величины) и поперечного (изменение фазы) регулирования напряжения. Силовая схема ТРН содержит параллельный трансформатор TV1 и

последовательный трансформатор TV2. Первичные обмотки трансформатора TV1 подключены к входным зажимам ТРН. Вторичные обмотки TV1 через модули поперечного и продольного регулирования подключены к первичным обмоткам трансформатора TV2. Вторичные обмотки трансформатора TV2, включенные между входными (А, В, С) и выходными (А2, В2, С2) зажимами ТРН (в рассечку линии), вносят продольно-поперечную составляющую напряжения, регулируруемую тиристорными коммутаторами по фазе и величине.

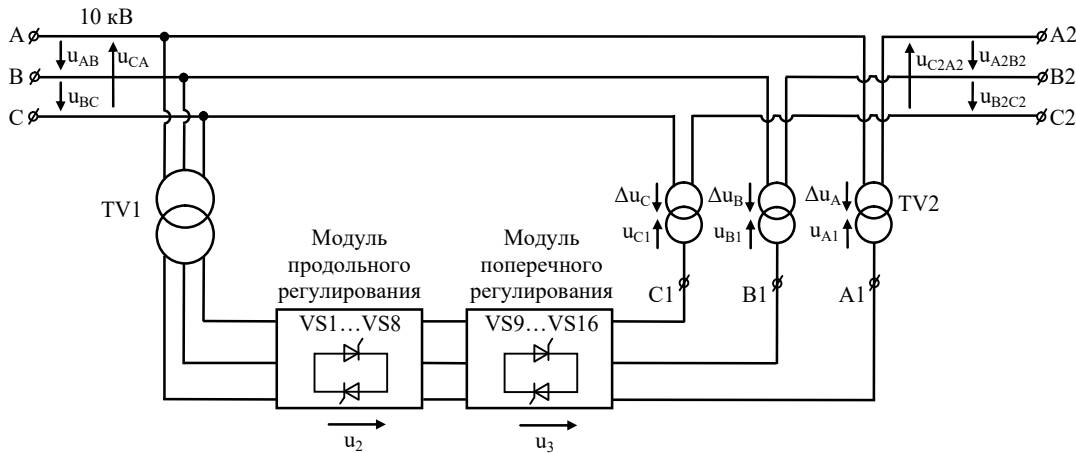


Рис. 1. Упрощенная схема ТРН

Модуль поперечного регулирования формирует на выводах вторичных обмоток трансформатора TV1 напряжения, сдвинутые на  $\pm 90^\circ$  относительно фазных напряжений сети. Это позволяет реализовать регулирование фазы выходного напряжения ТРН.

Модуль продольного регулирования вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, совпадающую или находящуюся в противофазе с фазным напряжением источника. Это позволяет реализовать регулирование величины выходного напряжения ТРН.

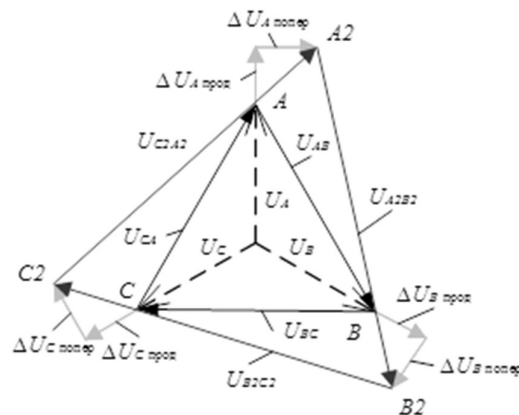


Рис. 2. Векторные диаграммы ТРН при продольно-поперечном регулировании

Оба модуля с помощью принятых схемных соединений тиристорных коммутаторов могут быть включены или исключены из цепи питания первичных обмоток трансформатора TV2. Совместное использование модулей поперечного и продольного регулирования позволяет реализовать продольно-поперечное регулирование выходного напряжения ТРН. Векторные диаграммы входных и выходных линейных напряжений при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования приведены на рис. 2.

Объектом исследования выбран участок РЭС 6 кВ в одной из линий которой установлен ТРН. Этот участок электрической сети имеет кольцевую конфигурацию с несколькими источниками питания (рис. 3). Питание в кольцевую сеть приходит по трем фидерам от подстанции ПС. Распределение потоков мощности между распределительными пунктами (РП) осуществляется по кабельным линиям. Для исследования потокораспределения в РЭС с ТРН разработана имитационная модель (рис. 4). Средой моделирования является приложение Simulink пакета программ Matlab. Технические параметры имитационной модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические параметры имитационной модели ТРН

Параметр	Значение
Номинальное напряжение	6 кВ ±10%
Диапазон изменения фазового угла напряжения $\alpha$	± 5°
Дискретность изменения фазового сдвига напряжения $\alpha$	1,5°
Диапазон регулирования величины напряжения	± 10%
Дискретность регулирования величины напряжения	≤ 1,5%
Мощность нагрузки	≤ 1000 кВА
Мощность шунтового трансформатора	106 кВА
Мощность серийного трансформатора	3x28 кВА

Исходными данными для моделирования являются: тип и длина кабельных линий, характер и номинальная мощность электрической нагрузки (табл. 2,3).

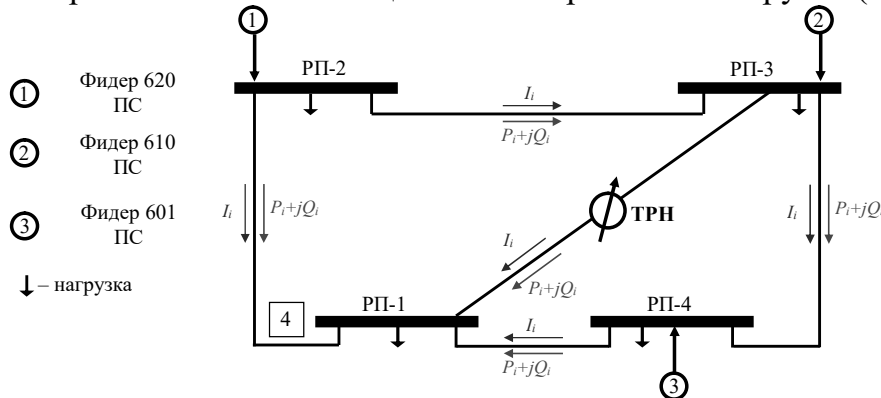


Рис. 3. Участок РЭС 6 кВ с ТРН

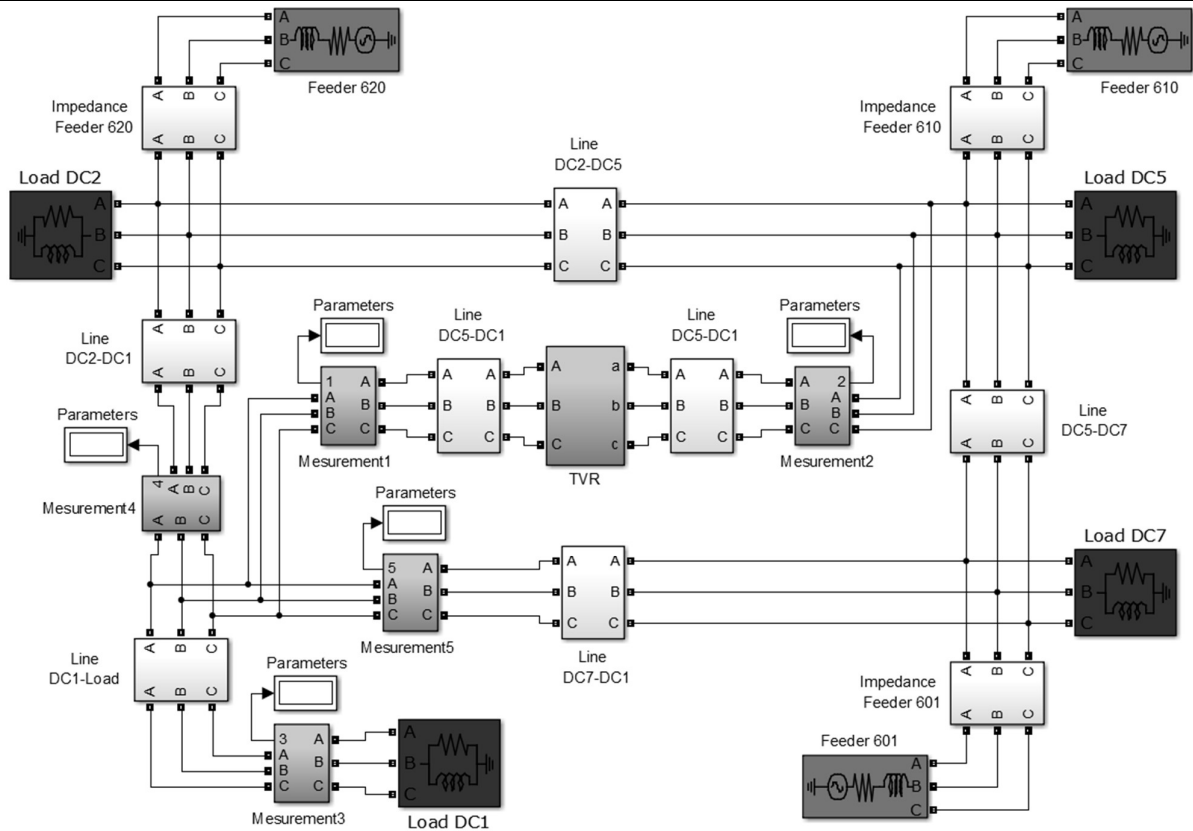


Рис. 4. Имитационная модель РЭС с ТРН

Таблица 2

Параметры кабельных линий РЭС с ТРН

Наименование линии	Марка и сечение линии	Длина линии, км	Удельные сопротивления линии, Ом/км	
			активное	реактивное
Фидер 620	ААБ-6 2(3×185)	2,5	0,064	0,040
Фидер 610	АСБ-6 2(3×185)	2,5	0,064	0,040
Фидер 601	ААБ-6 2(3×240)	2,5	0,049	0,039
РП-2-РП-1	АСБ-6 2(3×150)	0,8	0,080	0,041
РП-2-РП-3	АСБ-6 2(3×120)	1,0	0,098	0,042
РП-3-РП-4	АСБ-6 2(3×240)	0,9	0,049	0,039
РП-3-РП-1	ААБ-6 3×150	1,2	0,159	0,081
РП-4-РП-1	ААБ-6 2(3×120)	1,1	0,098	0,042
РП1-нагрузка	ААБл-6 3×35	0,7	0,89	0,087

При разработке имитационной модели РЭС с ТРН приняты следующие допущения:

- в качестве питающих линий приняты источники бесконечной мощности;
- активная проводимость изоляции электрической сети незначительна и поэтому не учитывается;
- удельные параметры электрической сети во времени неизменны;

- коэффициент загрузки силовых трансформаторов 6/0,4 кВ принят равным 0,85;
- коэффициент мощности нагрузки принят  $\cos\varphi=0,85$ ;
- электрическая сеть является симметричной.

С использованием имитационной модели РЭС с ТРН проведены исследования влияния ТРН на потокораспределение в замкнутой сети. В качестве примера на рис. 5 представлены зависимости тока ветви 1-2, содержащей ТРН. Величины вольтодобавки модулей продольного и поперечного регулирования составляют  $\pm 600$  В, что обеспечивает диапазон продольного регулирования  $\pm 9,2\%$  и поперечного  $\pm 4,9\%$ .

Таблица 3

Параметры электрических нагрузок

Потребитель	Напряжение, кВ	Частота, Гц	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
РП-1	6	50	809,2	142,8
РП-2			4154,4	733,1
РП-3			3655,8	645,2
РП-4			2622,7	462,8

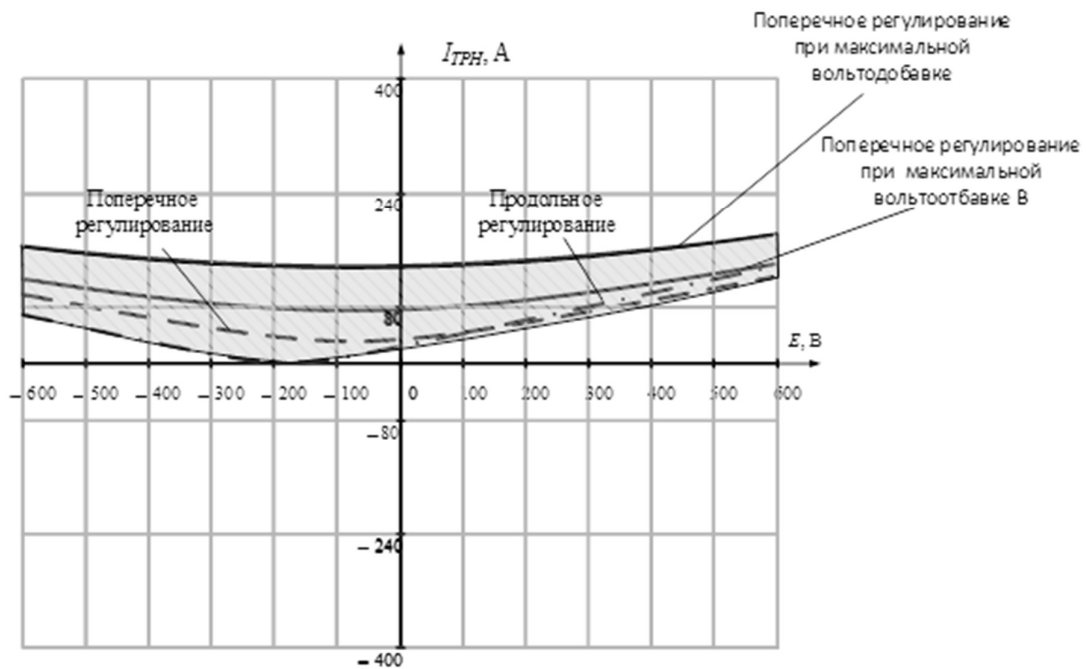


Рис. 5. Ток ветви с ТРН при продольно-поперечном регулировании

### Выводы

1. Продольно-поперечное регулирование напряжения ТРН позволяет регулировать потоки как активной, так и реактивной мощности.

2. Направление и величина потоков мощности в ветви с ТРН определяется как величиной, так и фазой вводимой ЭДС модулей продольного и поперечного регулирования.
3. Применение продольно-поперечного регулирования позволяет исключить перемотки активной, реактивной или активно-реактивной мощности через ветвь, содержащую ТРН.

#### Библиографический список

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р), 2020. – 92 с.
2. Rakhi K., Prerna, Chitrangada R. Modelling of UPFC (Unified Power Flow Control) to Improve Stability of Power System by Real and Reactive Power Control of Transmission Line // *Advances in Systems Control and Automation*. 2017. № 442. С. 647-655.
3. Воропай Н.И. От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету // *Электричество*. 2020. № 12. С. 10-13.
4. Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. Универсальное фазоповоротное устройство для сетей среднего и высокого напряжения, Пат. на полезную модель 180964 RU, заявл. 01.12.2017; опубл. 02.07.2018. – Бюл. № 19.
5. Sosnina E., Kralin A., Bedretdinov R., Kryukov E. Harmonic Analysis of the Thyristor Regulator Output Voltage // 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA). 2018. С. 1-5.



A.A. Kralin, A.A. Asabin, R.Sh. Bedretdinov, E.V. Kryukov

## RESEARCH OF THE THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR IMPACT ON THE POWER FLOWS CHANGING IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

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

**Abstract:** The article deals with the new scientific and technological solutions, developed by the authors, which helps to create the automatic power flow control stations in power distribution networks with the voltage of 0.4 kV. The description of a design of the power flow control device is provided. The algorithm of power flows control is described. The article is devoted to the study of the power flows redistribution in a distribution electric network (DEN) with a thyristor voltage regulator (TVR). TVR is designed to regulate power flows and stabilize voltage in a 6-20 kV medium voltage electrical network. The problems in the 6-20 kV electrical network are analyzed and the ways of their solution are determined. The features of the TVR operation, its technical characteristics are considered. A simulation model of the DEN with TVR was developed, the study of the flow distribution in the electric network was carried out.

**Key words:** thyristor voltage regulator, power flows, electrical distribution network.

### References

- [1] Energy Strategy of the Russian Federation until 2035, June 2020.
- [2] K. Rakhi, Prerna and R. Chitrangada, “Modelling of UPFC (Unified Power Flow Control) to Improve Stability of Power System by Real and Reactive Power Control of Transmission Line”, *Advances in Systems Control and Automation*, vol. 442, pp. 647-655, 2017.
- [3] N.I. Voropay, “From the GOELRO Plan to the Global Electric Power Internet”, *Electrichestvo*, No. 12, pp. 9–13, 2020 (in Russian).
- [4] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov, “Universal phase-shifting device for medium and high voltage networks [Universal'noye fazopovorotnoye ustroystvo dlya setey srednego i vysokogo napryazheniya]”, Patent RU 180964, Jul. 02, 2018 (in Russian).
- [5] E. Sosnina, A. Kralin, R. Bedretdinov and E. Kryukov, “Harmonic Analysis of the Thyristor Regulator Output Voltage”, in proc. *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*, 2018, pp. 1-5.

А.В. Крюков<sup>1,2</sup>, Д.А. Середкин<sup>1</sup>, И.А. Фесак<sup>1</sup>

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Иркутский государственный университет путей сообщения <sup>1</sup>  
Иркутский национальный исследовательский технический университет <sup>2</sup>

**Аннотация:** Повышение энергетической эффективности и улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог возможно с помощью тяговых сетей повышенного напряжения. В современных условиях для внедрения таких сетей необходима разработка их цифровых моделей, обеспечивающих адекватный анализ качества электроэнергии и энергетической эффективности. Такие модели могут быть реализованы на базе методов моделирования режимов систем электроснабжения в фазных координатах, реализованных в программном комплексе Fazonord, разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты моделирования режимов перспективных систем электроснабжения железных дорог с тяговыми сетями 50 и 50+110 кВ.

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения повышенного напряжения, качество электроэнергии, моделирование.

**Введение.** Для увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей, снижения потерь мощности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог предлагается использовать системы тягового электроснабжения (СТЭ) повышенного напряжения, например, 50 кВ и 50+110 кВ [1–7]. Для практического применения этих СТЭ необходим детальный анализ их режимов на основе цифровых моделей. Одна из важных задач такого анализа заключается в определении показателей качества электроэнергии. В статье представлены результаты определения этих показателей для перспективных СТЭ повышенного напряжения. Для сравнения выполнено моделирование традиционной СТЭ 25 кВ.

**Методика и результаты моделирования.** Для определения качества электроэнергии в СТЭ 50 и 50+110 кВ можно использовать методы моделирования, реализованные в программном комплексе Fazonord, разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. Принципы его применения для определения режимов СТЭ описаны в работе [8].

Моделирование режимов СТЭ 50 кВ и 50+110 кВ проведено применительно к двухпутному участку. Расчетные схемы, фрагменты которых показаны на рис. 1, имели в своем составе модели трех тяговых трансформаторов и двух межподстанционных зон (МПЗ). Левая МПЗ была разбита на пять участков протяженностью по 10 км. Кроме того, в схеме были представлены модели четырех линий электропередачи 220 кВ.

При моделировании рассматривалось движение семи поездов массой 6300 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т – в четном. График движения и токовые профили поездов приведены на рис. 2.

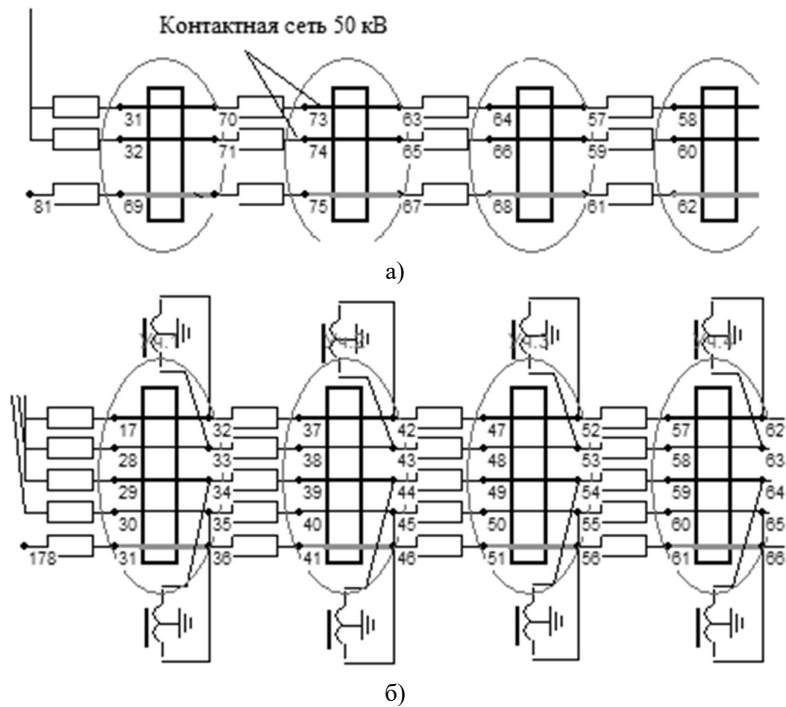


Рис. 1. Фрагменты схем расчетных моделей: а – 50 кВ; б – 50+110 кВ

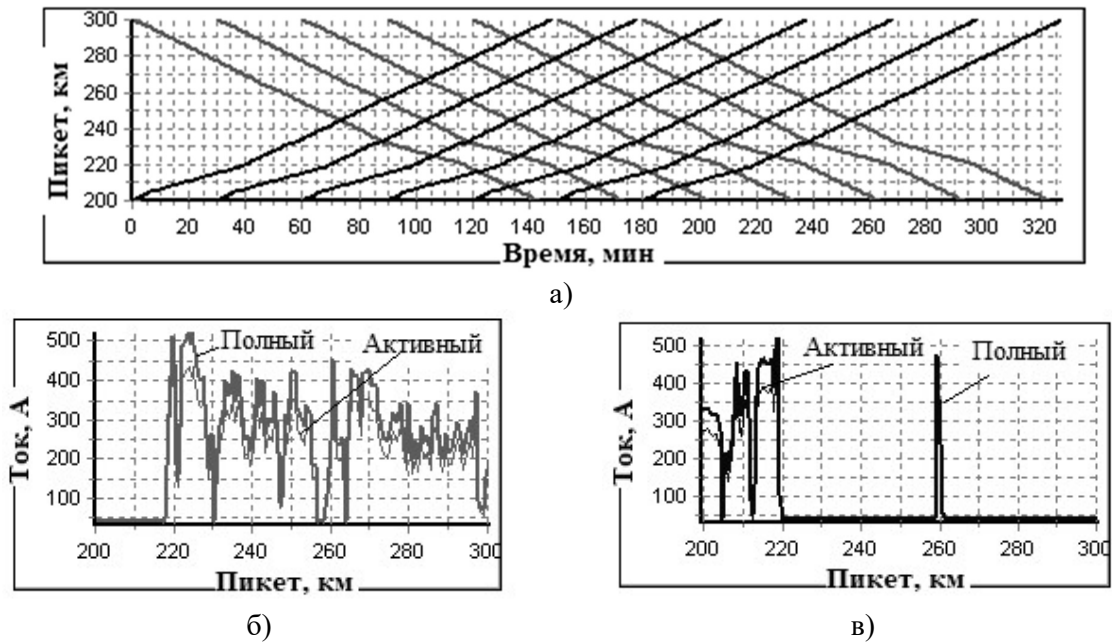


Рис. 2. График движения и токовые профили поездов:

а – график движения; б – токовый профиль нечетного массой 6300 т; в – то же для четного массой 6000 т

Результаты моделирования представлены в табл. 1, 2 и на рис. 3 – 4. На рис. 3 и в табл. 1 приведены результаты определения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ средней тяговой подстанции (ТП 2)

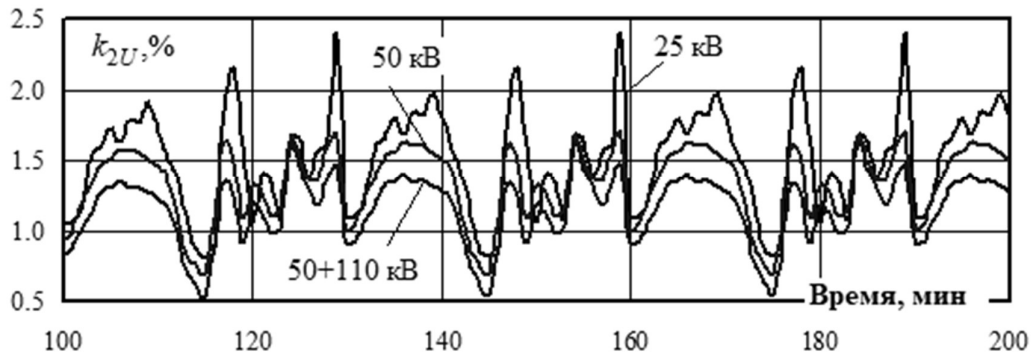


Рис. 3. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ второй тяговой подстанции (ТП)

Таблица 1

Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  на шинах 220 кВ ТП 2

Параметр	Тип СТЭ			Различие, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
Минимум	0,04	0,04	0,08		
Ср. значение	0,98	0,87	0,76	10,93	22,61
Максимум	2,39	1,68	1,61	29,71	32,64
Размах	2,35	1,64	1,53	30,21	34,89
СКО	0,43	0,36	0,31	16,85	28,69

Примечание: СКО – среднеквадратичное отклонение

На основе представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1. За счет уменьшенных токов в тяговых сетях (ТС) 50 и 50+110 кВ средние значения  $k_{2U}$  на вводах 220 кВ ТП снижаются соответственно на 11 и 22 % по сравнению с типовой ТС 25 кВ. Аналогичные показатели для максимумов составляют 30 и 35 %. Следует отметить, что в ТС 25 кВ величины  $k_{2U}$  превышают нормально допустимые значения.

2. Заметно уменьшаются показатели, характеризующие динамику изменения несимметрии во времени. Размах колебаний снижается для ТС 50 кВ на 30 %, а для ТС 50+110 кВ – на 35 %. Аналогичные данные по СКО составляют соответственно 17 и 29 %. Следовательно, в перспективных ТС для устранения несимметрии при выходе ее за допустимые пределы при росте тяговых нагрузок потребуется меньший диапазон регулирования симметрирующих устройств, выполненных, например, по технологиям FACTS.

На рис. 4 и в табл. 2 приведены результаты определения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. На шинах высокого напряжения перспективных ТС наблюдается повышенный уровень гармонических искажений по сравнению с ТС 25 кВ. Исключение составляет фаза С ТП 1, для которой величина  $k_U$  в СТЭ 50+110 кВ ниже, чем в СТЭ 25 кВ.

2. По фазам А и С наибольший уровень гармонических искажений наблюдается для тяговых подстанций СТЭ 50 кВ. По фазе В максимумы  $k_U$  имеют место в СТЭ 50+110 кВ.

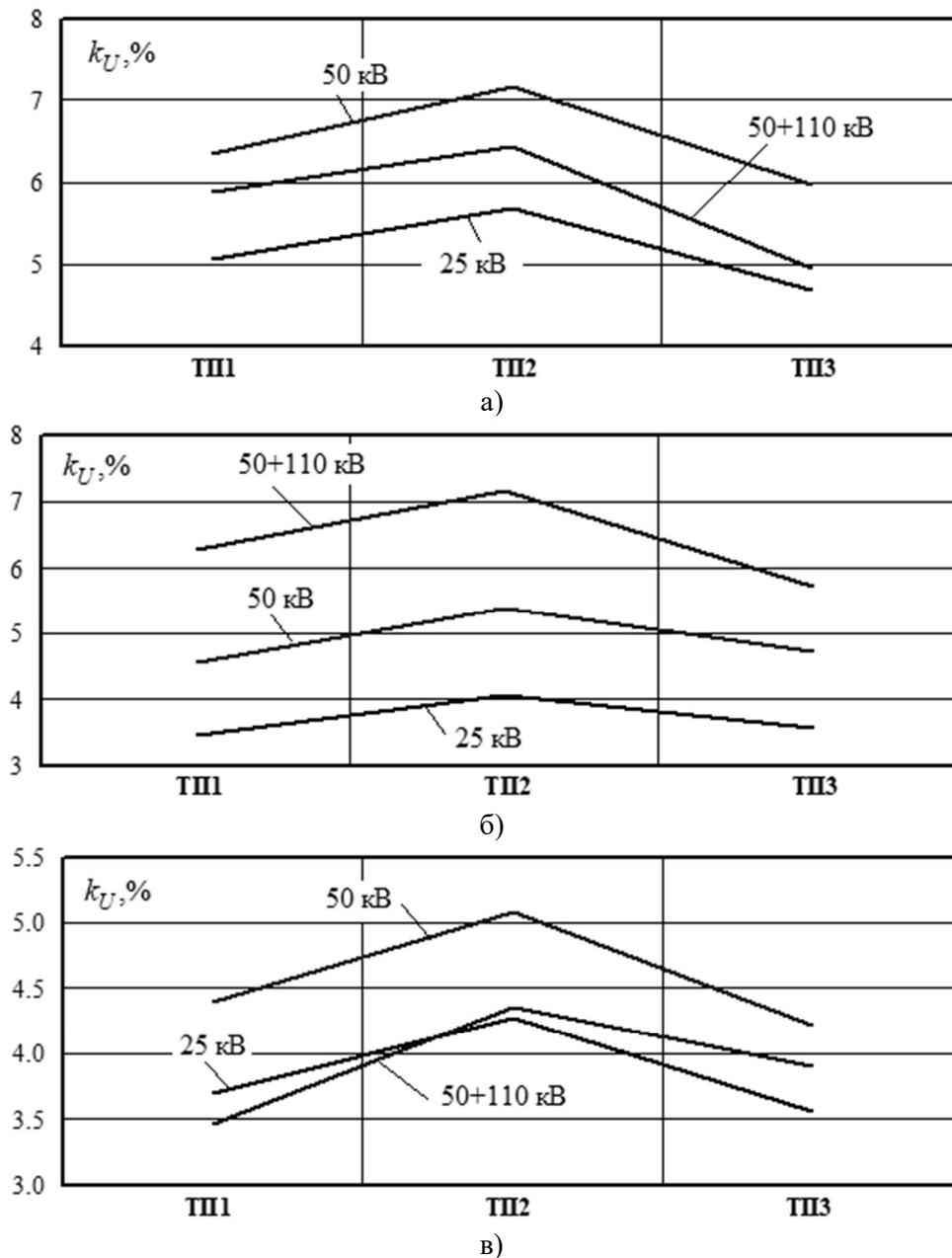


Рис. 4. Коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ ТП:  
а – фаза А; б – фаза В; с – фаза С

Таблица 2

Средние значения коэффициентов гармоник  $k_U$  на шинах 220 кВ ТП

Фаза	ТП	Тип СТЭ			Различие, %	
		25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	Между столбцами 3 и 4	Между столбцами 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7
А	ТП1	5, 05	6, 35	5, 87	-25, 74	-16, 24
	ТП2	5, 67	7, 18	6, 45	-26, 63	-13, 76
	ТП3	4, 68	5, 97	4, 95	-27, 56	-5, 77
В	ТП1	3, 46	4, 56	6, 28	-31, 79	-81, 50
	ТП2	4, 07	5, 39	7, 17	-32, 43	-76, 17
	ТП3	3, 55	4, 72	5, 73	-32, 96	-61, 41
С	ТП1	3, 7	4, 39	3, 47	-18, 65	6, 22
	ТП2	4, 28	5, 08	4, 35	-18, 69	-1, 64
	ТП3	3,56	4,22	3,91	-18,54	-9,83

**Заключение.** На основе методов моделирования сложно-несимметричных и несинусоидальных режимов, разработанных в ИрГУПСе, реализованы модели внешнего и тягового электроснабжения магистральных железных дорог с перспективными тяговыми сетями 50 и 50+110 кВ. Эти модели могут применяться на практике при решении задач модернизации существующих систем тягового электроснабжения.

Результаты моделирования показали, что СТЭ с повышенным напряжением в тяговой сети обеспечивают снижение уровней несимметрии на шинах высокого напряжения тяговых подстанций по сравнению с широко распространенными СТЭ 25 кВ. Однако по критерию гармонических искажений СТЭ повышенного напряжения уступают традиционной системе 25 кВ. Поэтому окончательное решение о применении таких СТЭ должно приниматься на основе комплексного анализа экономических, технических и экологических [9] факторов.

## Библиографический список

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников - М.: Интекст, 2002. – 104 с.
2. Котельников, А. В. Железнодорожный транспорт России в 2000-2030 гг. (научная концепция) / А. В. Котельников, А. С. Нестрахов // Вестник ВНИИЖТ. – № 5. – 2000. – С. 3-15.
3. Kotelnikov A., Glonti A. Word trends in the development of railway electrification // Rail International. 2001. August/September. – P. 26-35.
4. Бадёр, М. П. Энергосберегающие технологии интеллектуального железнодорожного транспорта / М. П. Бадёр, Ю. М. Иньков, Е. Н. Розенберг // Электроника и электрооборудование транспорта. – № 4. – 2012. – С. 36-43.

5. **Котельников, А. В.** развития электрификации железных дорог России и задачи электротехнической промышленности по ее обеспечению / А. В. Котельников, А. Л. Лисицын, В. А. Быков // Электро. – № 2. – 2001. – С. 2-4.
6. **Василянский, А. М.** Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц / А. М. Василянский, Р. Р. Мамошин, Г. Б. Якимов // Железные дороги мира. – № 8. – 2002. – С. 40-46.
7. **Котельников, А. В.** Электромагнитная безопасность систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А. В. Котельников, А. Б. Косарев, И. И., Полишкина [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – № 6. – 2002. – С. 10-14.
8. **Закарюкин, В. П.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. - Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. – 273 с.
9. **Буякова, Н.В.** Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. - Ангарск: АНГТУ, 2018. – 382 с

A.V. Kryukov <sup>1,2</sup>, D.A. Seredkin <sup>2</sup>, I.A. Fesak

## ELECTRICITY QUALITY IN PERSPECTIVE ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS FOR MAIN RAILWAYS

Irkutsk State Transport University <sup>1</sup>  
Irkutsk National Research Technical University <sup>2</sup>

**Abstract:** One of the ways to solve the problems of increasing energy efficiency and improving the quality of electricity in the power supply systems of the main railways is to use high voltage traction networks. In modern conditions, for the introduction of such networks, it is necessary to develop their digital models that provide an adequate analysis of the quality of electricity and energy efficiency. Such models can be implemented on the basis of methods for modeling the modes of power supply systems in phase coordinates, implemented in the Fazonord software complex, developed at the Irkutsk State Transport University. The article presents the results of modeling the modes of promising power supply systems for railways with traction networks of 50 and 50 + 110 kV.

**Key words:** high voltage traction power supply systems, power quality, modeling.

### References

- [1] Kotelnikov A. V. Electrification of railways. World trends and prospects. Moscow: Intekst, 2002. 104 p.
- [2] Kotelnikov A. V., Nestrakhov A. S. Railway transport of Russia in 2000-2030. (scientific concept) // Bulletin of railway research institute . No. 5. 2000. P. 3-15.
- [3] Kotelnikov A., Glonti A. World trends in the development of railway electrification // Rail International. 2001. August / September. P. 26-35.
- [4] Bader M. P., Inkov Yu. M., Rosenberg E. N. Energy saving technologies of intelligent railway transport // Electronics and electrical equipment of transport. No. 4. 2012. P. 36-43.
- [5] Kotelnikov A. V., Lisitsyn A. L., Bykov V. A. Prospects for the development of electrification of Russian railways and the tasks of the electrical industry for its provision. No. 2. 2001. P. 2-4.
- [6] Vasilyanskiy A. M., Mamoshin R. R., Yakimov G. B. Improvement of the traction power supply system for railways electrified on alternating current 27.5 kV, 50 Hz // World Railways. No. 8. 2002. P. 40-46.
- [7] Electromagnetic safety of high-voltage traction power supply systems / A. V. Kotelnikov, A. B. Kosarev, I. I. Polishkina [and others] // Bulletin of railway research institute. No. 6. 2002. P. 10-14.
- [8] Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
- [9] Buyakova N. V., Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Electromagnetic safety in railroad power supply systems: modeling and control. Angarsk, 2018. 382 p.



УДК 621.311:004.94

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_213

**И.А. Липужин**

## **ТЕСТОВЫЕ СХЕМЫ IEEE И СИГРЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Тестовые схемы предназначены для проведения исследований систем электроэнергетики, как традиционных, так и с наличием распределенных источников энергии. Приведено описание основных тестовых схем, разработанных международными организациями IEEE и СИГРЭ, и указаны источники, в которых приведены их параметры. Обозначен круг основных задач, при решении которых могут применяться тестовые схемы.

**Ключевые слова:** тестовая схема, тестовая модель, модель сети, IEEE, СИГРЭ.

### **Введение**

В процессе исследования перед учеными встает задача проведения натуральных испытаний для подтверждения работоспособности и эффективности предлагаемых решений. Зачастую этот процесс является дорогостоящим и трудоемким, а для исследований в области электроэнергетики он также затрудняется необходимостью получения разрешений и согласований электросетевой компании. Поэтому широко распространенным методом исследований является имитационное моделирование. Однако недостаточно смоделировать лишь объект исследования, необходимо также создать модель системы электроснабжения, которая позволит объективно представить весь функционал разработки. На этом этапе и появляется проблема поиска подходящей системы для моделирования.

За рубежом для решения этой задачи используются "тестовые схемы" (test system или benchmark system), подробно описывающие структуру и параметры элементов системы электроснабжения (рис. 1). Схемы состоят из набора узлов (или шин – «buses») как одного, так и разных уровней напряжения, объединенных между собой линиями электропередачи. Узлы могут представлять собой трансформаторные или распределительные подстанции, точки подключения нагрузочных ответвлений или источников питания. Кроме самой схемы сети обязательно приводятся параметры каждого узла (например, номинальное напряжение, мощности нагрузок) и линии электропередачи (длины, сопротивления), а также весь необходимый набор дополнительных данных.

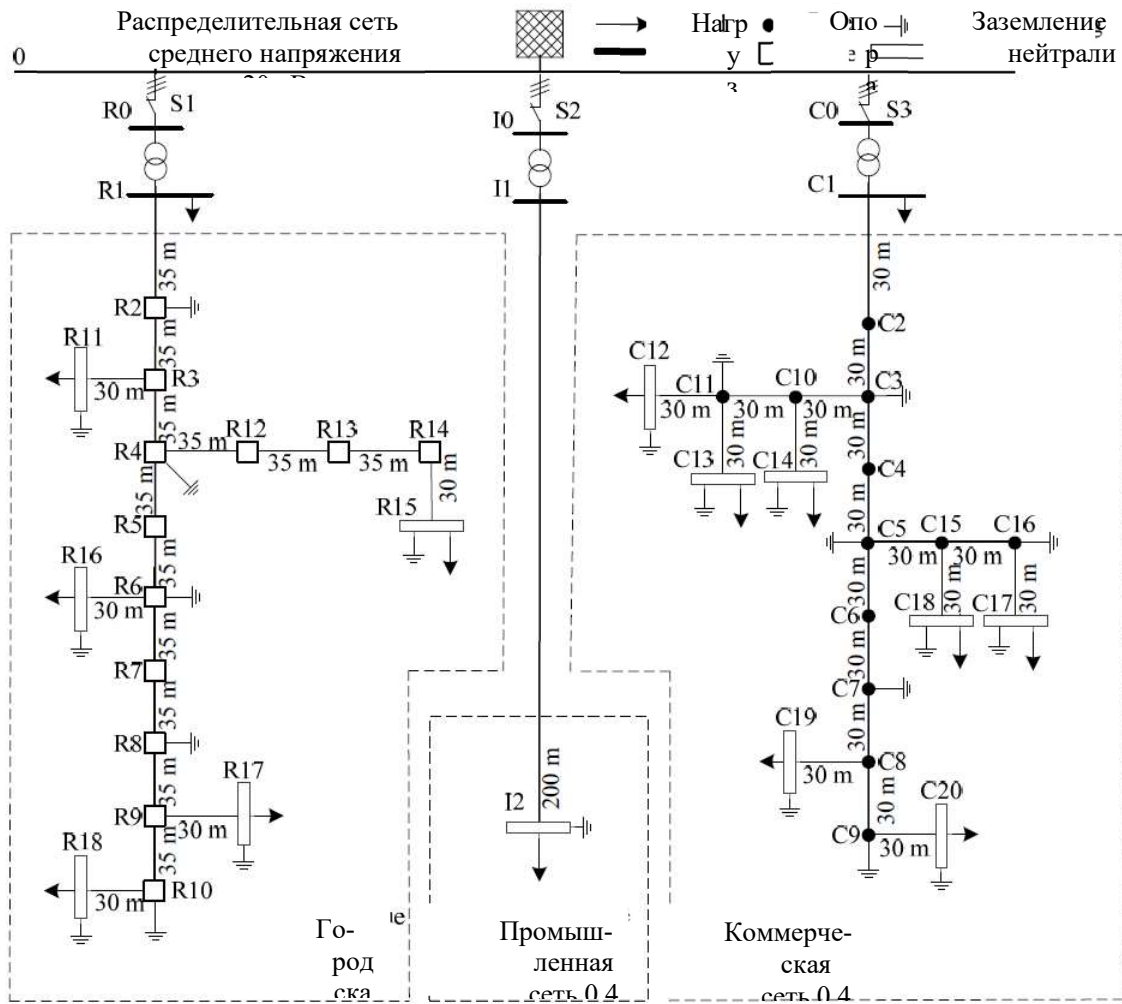


Рис. 1. Однолинейная схема тестовой модели Европейской низковольтной сети

Наибольшее распространение получили тестовые схемы, разработанные специалистами американского института инженеров электротехники и электроники (IEEE) и международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ).

### Тестовые схемы IEEE

В настоящее время выделяют несколько групп схем IEEE:

- 1) тестовые схемы для оценки надежности (IEEE Reliability Test System) [1, 2];
- 2) тестовые схемы для исследования установившихся режимов (IEEE test systems for steady-state studies), наибольшее распространение получили IEEE 14-, 30-, 39-, 57- и 118- узловые тестовые схемы. Оригиналы схем в формате IEEE Common Data Format [3] можно найти в [4, 5]. Несмотря на их основное назначение, их модификации могут использоваться и для моделирования переходных процессов [6]. В [7] приведены параметры модифицированных схем;

3) тестовые схемы распределительных сетей (IEEE distribution test feeders). В [8] можно найти параметры, ссылки на статьи с результатами исследований и исполнительные файлы для различных программ моделирования;

4) тестовые схемы для оценки устойчивости напряжения (test systems for voltage stability analysis and security assessment). Подробный анализ схем приведен в [9], а модели систем можно найти в [10];

5) тестовые схемы для оценки статической устойчивости (benchmark systems for small-signal stability analysis and control). Схемы предназначены для сравнения методов и алгоритмов оценки статической устойчивости, а также разных методов настройки стабилизаторов систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов (power system stabilizer - PSS). Краткое описание и сравнение полученных результатов представлены в [11]. В [12] представлены подробные данные о схемах, результаты расчетов и исполнительные файлы Matlab.

Почти все описанные схемы рассчитаны на работу с частотой тока в сети 60 Гц, поэтому их применение в отечественной практике ограничено.

### Тестовые схемы СИГРЭ

СИГРЭ разработаны схемы для исследования сетей постоянного тока: CIGRE HVDC и CIGRE B4 DC. CIGRE HVDC представляет собой две высоковольтных сети переменного напряжения, объединенные с помощью вставки постоянного тока на напряжении  $\pm 500$  кВ. Основное назначение - сравнение различных методов управления преобразовательным оборудованием. CIGRE B4 DC включает в себя несколько участков сетей как переменного, так и постоянного тока, часть из которых имеет связь с сетями переменного тока, а часть работает независимо [13].

В [14] приведены тестовые модели для интеграции распределенных источников энергии (в том числе возобновляемых). Они представляют собой эквивалентные схемы сетей американской и европейской конфигурации для трех уровней напряжения. Причиной такого деления является разница в структуре распределительных сетей, системе заземления, уровнях напряжения, частоты и типом используемых кабельных и воздушных линий.

Кроме этого, в зависимости от задач исследования, тестовые модели разделены на два типа:

- 1) тестовые модели для исследования источников распределенной генерации (resource-side benchmark);
- 2) тестовые модели электрической сети (network benchmarks).

Схемы 1 типа применяются для изучения эффектов взаимосвязи возобновляемых и распределенных энергоресурсов с электроэнергетическими системами и для подробного анализа конкретных топологий преобразователей и их систем управления.

Схемы 2 типа предназначены для оценки влияния интеграции распределенных источников энергии на электрические сети. Они разделяются по классам

напряжения на сети высокого, среднего и низкого напряжения. В табл. 1 приведен список задач, для решения которых рекомендуется применение тестовых моделей второго типа.

Таблица 1

## Область возможного применения тестовых моделей СИГРЭ

Направление исследования	Задача исследования
Управление и контроль	Управление спросом на электроэнергию (demand side response)
	Контроль энергопотребления (управление резервами)
	Экологическая оценка (снижение выбросов в окружающую среду)
	Контроль частоты сети (поддержание баланса активной мощности)
	Оптимальное распределение потоков мощности (снижение потерь электроэнергии)
	Энергетическая безопасность
	Использование электромобилей (vehicle-to-grid, V2G)
	Управление напряжением
	Задачи оптимизации типа и количества источников энергии (unit commitment)
	Управление устройствами силовой электроники
Проектирование	Выбор места размещения источников
	Усиление сети (distribution reinforcement)
	Принятие инвестиционных решений
	Вопросы развития систем электроснабжения
	Выбор типа полупроводниковых преобразователей для подключения источников
Качество электроэнергии	Феррорезонанс
	Фликер
	Гармоники
	Запуск двигателей (расчет пусковых токов)
	Надежность электроснабжения
	Несимметрия (влияние однофазных источников)
	Отклонение напряжения (управление реактивной мощностью)
Защита	Координация действий коммутационной аппаратуры
	Определение токов короткого замыкания
	Остаточное напряжение в точке короткого замыкания
	Выбор способов заземления нейтрали
	Перенапряжения
	Влияние источников на срабатывание релейной защиты
Устойчивость	Изолированный режим работы микросети (islanding)
	Требования к устойчивости при провалах напряжения (low voltage ride through)
	Статическая устойчивость
	Проектирование систем управления источниками
	Динамическая устойчивость
	Устойчивость напряжения

В [14] приведены примеры исследований, выполненных с помощью тестовых моделей, и их результаты.

Преимуществом схем CIGRE является их широкая гибкость. Исследователям предлагается свобода в выборе номинального напряжения, типа и длины линий электропередачи, а также расположения и величины мощности нагрузок. Для верификации собранных моделей необходимо сравнить полученные результаты со значениями токов и напряжений, полученными при расчете потоков мощности, приведенными в [14].

### Применение тестовых схем

В табл. 2 представлены основные параметры тестовых схем, представляющих наибольший интерес для отечественных исследователей. Выбор конкретной схемы зависит от задач исследования, а также от требуемой конфигурации сети (количества узлов, уровня напряжения). Детальный анализ направлений использования и областей применения основных тестовых схем приведен в [15].

Таблица 2

Тестовые схемы IEEE и СИГРЭ с частотой тока в сети 50 Гц

№	Название схемы	Основные параметры			Источник данных
		Узлы, шт.	Генераторы, шт.	Напряжение, кВ	
<b>IEEE</b>					
1. Тестовые схемы распределительных сетей					
1.1	Европейский тестовый фидер низкого напряжения	906	-	0,4	[8]
2. Тестовые схемы для оценки устойчивости напряжения					
2.1	Скандинавская тестовая система	74	20	130 220 400	[10, 16]
3. Тестовые схемы для оценки статической устойчивости					
3.1	Упрощенная модель австралийской сети с 14 генераторами	59	14	15-500	[12, 17]
<b>СИГРЭ</b>					
1. Тестовые модели для исследования сетей постоянного тока					
1.1	СИГРЭ тестовая модель высоковольтной передачи на постоянном токе	2	-	230 345	[18]
1.2	СИГРЭ тестовая модель сети на постоянном токе	26	-	±200 ±400 145 380	[13]
2. Тестовые модели для интеграции распределенных источников энергии					
2.1	Модель Европейской сети высокого напряжения	13	-	220 380	[14]
2.2	Модель Европейской сети среднего напряжения	14	-	20	
2.3	Модель Европейской низковольтной сети	19+3+21	-	0,4	

Для моделирования тестовых схем наиболее часто используются программные комплексы Matlab Simulink, PSCAD, PSS/E (Power System Simulator

for Engineering) [19] и ETAP. Для исследования устойчивости и потокораспределения в Matlab применяют модуль PSAT (Power System Analysis Toolbox) [20] и пакет MATPOWER [21].

В Америке для расчетов электроэнергетических режимов распространение получили программы: ANAREDE (анализ режимов), ANATEM (электромеханические переходные процессы), PACDYN (статическая устойчивость) [22].

Преимущества тестовых схем:

- 1) полный объем информации о системе (конфигурация сети, уровни напряжения узлов, параметры элементов, мощности нагрузок);
- 2) несмотря на то, что все вышеперечисленные тестовые схемы разработаны для решения вполне определенных задач, их применение ими не ограничивается. Почти все параметры тестовой схемы можно изменять, подстраивая под конкретные требования исследователя (таким образом появилось почти бесконечное количество тестовых схем IEEE, которые встречаются в зарубежных работах);
- 3) в открытом доступе находятся уже собранные имитационные модели (наиболее распространены Matlab модели) и результаты расчетов режимов их работы.

PSCAD модели 9-, 14-, 30-, 39- и 118-узловых тестовых схем IEEE можно найти в [23]. Модели некоторых схем в программе Matlab можно найти в [2, 12]. В [24] приведены данные и модели в формате MATPOWER энергосистемы Франции (RTE) и европейской энергосистемы, созданные в рамках программы PEGASE [25].

В качестве недостатков тестовых схем можно отметить:

- 1) большой объем информации, представленный в виде txt файлов;
- 2) формат задания исходных данных может быть неудобен для моделирования схемы в некоторых программных продуктах. Это обусловлено разным объемом и форматом требуемой исходной информации, например в Simulink и PSCAD;
- 3) часть требуемой информации может отсутствовать, а ее самостоятельный поиск затруднен отличиями в типах используемой продукции (например, кабельных линий, трансформаторов) за рубежом и в России;
- 4) параметры схем IEEE представлены в формате IEEE Common Data Format [26].

Имеющиеся недостатки компенсируются за счет допустимости широкого изменения параметров исходной схемы при ее моделировании.

### Заключение

Тестовые схемы применяются исследователями по всему миру и используются в качестве общепризнанного инструмента при проведении исследований систем энергетики. Применение тестовых схем позволяет:

- решить проблему поиска и выбора объекта исследования;
- использовать заранее апробированные методы исследования;

- наглядно сравнивать результаты различных работ, выполненных в разное время коллективами ученых из разных стран (например, методы оптимизации или работу алгоритмов управления или релейной защиты), используя одинаковые исходные параметры тестовой системы.

Применение тестовых схем до сих пор не нашло широкого применения у отечественных исследователей. Отчасти это вызвано малым объемом информации о них в русскоязычных источниках. Выходом из сложившейся ситуации может быть создание полноценного интернет-ресурса с размещением полного перечня тестовых моделей вместе с их параметрами, а также готовыми моделями, которые можно скачать и использовать в своих исследованиях (например, [4] или [27]).

Эффективным может оказаться адаптация международного стандарта СИГРЭ, перевод его на русский язык и уточнение параметров схем с учетом отличий отечественной энергетики. В этом случае понятие тестовых схем и их параметры смогут получить официальный статус на территории России.

#### Библиографический список

1. Grigg C. et al. The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee // IEEE Transactions on Power Systems. 1999. Vol. 14. No. 3. P. 1010–1020, doi: 10.1109/59.780914.
2. IEEE RTS 24-bus case // The Data Repository for Power system Open models With Evolving Resources (DR POWER). [Электронный ресурс]. URL: <https://eGRIDdata.org/dataset/ieee-rts-24-bus-case> (дата обращения 26.04.2021).
3. Pierce H.E. et al. Common format for exchange of solved load flow data // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1973. Vol. PAS-92. No. 6. P. 1916-1925, doi: 10.1109/TPAS.1973.293571.
4. Power Cases // Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG). [Электронный ресурс]. URL: <https://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/> (дата обращения 24.04.2021).
5. Power systems test case archive // University of Washington. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> (дата обращения 20.03.2021).
6. Demetriou P., Asprou M., Quiros-Tortos J., Kyriakides E. Dynamic IEEE test systems for transient analysis // IEEE Systems Journal. 2017. Vol. 11. No. 4. P. 2108-2117, doi: 10.1109/JSYST.2015.2444893.
7. Dynamic IEEE Test Systems // KIOS Research Center for Intelligent Systems and Networks of the University of Cyprus. [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.kios.ucy.ac.cy/test-systems/> (дата обращения 20.04.2021).
8. Resources // IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. [Электронный ресурс]. URL: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> (дата обращения 25.04.2021).
9. Van Cutsem T. et al. Test systems for voltage stability studies // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35. No. 5. P. 4078-4087, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2976834.
10. Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment // Power System Dynamic Performance Committee [Электронный ресурс]. URL: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/489-2/> (дата обращения 22.04.2021).
11. Canizares C. et al. Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. Vol. 32. No. 1. P. 715-722, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2561263.
12. Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control // Power System Dynamic

- Performance Committee. [Электронный ресурс]. URL: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/benchmark-systems-2/> (дата обращения 22.04.2021).
13. Vrana T.K., Yang Y., Jovcic D., Dennetière S., Jardini J., Saad H. The CIGRE B4 DC grid test system // *Electra*. 2013. Vol. 270. No. 9. P. 10–19.
  14. Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources. CIGRE Task Force C6.04.02, Technical Brochure 575, 2014, 119 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cigre.org/publication/575-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-energy-resources> (дата обращения 20.07.2020).
  15. Peyghami S., Davari P., Fotuhi-Firuzabad M., Blaabjerg F. Standard test systems for modern power system analysis: An Overview // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2019. Vol. 13. No. 4. P. 86-105, doi: 10.1109/MIE.2019.2942376.
  16. Van Cutsem T. et al. Test systems for voltage stability analysis and security assessment. IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, Tech. Rep. PES-TR19, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/technical-publications/technical-reports/PESTR19.html> (дата обращения 22.04.2021).
  17. Canizares C. et al. Benchmark systems for small-signal stability analysis and control. IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, Tech. Rep. PES-TR18, 2015, 390 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PESTR18.html> (дата обращения 22.04.2021).
  18. Szechtman M. et al. The CIGRE HVDC Benchmark Model: A new proposal with revised parameters // *Electra*. 1994. No. 157. P. 61–67.
  19. PSS®E – high-performance transmission planning and analysis software // Siemens. [Электронный ресурс]. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/pss-e.html> (дата обращения 06.05.2021).
  20. PSAT // Prof. Federico Milano's website. [Электронный ресурс]. URL: <http://faraday1.ucd.ie/psat.html> (дата обращения 07.05.2021).
  21. MATPOWER. [Электронный ресурс]. URL: <https://matpower.org/> (дата обращения 07.05.2021).
  22. Nossos produtos [Наши продукты] // CEPEL. Departamento de Redes Eléctricas [CEPEL. Департамент электрических сетей]. [Электронный ресурс]. URL: <https://dre.cepel.br/Programa> (дата обращения 12.05.2021) (на Португальском).
  23. IEEE Benchmarks // Manitoba Hydro International Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-51/v-> (дата обращения 13.05.2021).
  24. Power system test cases // Fraunhofer IEE and University of Kassel. [Электронный ресурс]. URL: [https://pandapower.readthedocs.io/en/v2.6.0/networks/power\\_system\\_test\\_cases.html#pandapower.networks.case2848rte](https://pandapower.readthedocs.io/en/v2.6.0/networks/power_system_test_cases.html#pandapower.networks.case2848rte) (дата обращения 16.05.2021).
  25. Jozs C., Fliscounakis S., Maenght J., Panciatici P. AC power flow data in MATPOWER and QCQP format: iTesla, RTE snapshots, and PEGASE. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1603.01533> (дата обращения 16.05.2021).
  26. IEEE Common Data Format // University of Washington. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/formats/cdf.txt> (дата обращения 13.03.2021).
  27. Тестовые схемы // Отдел энергетики ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН. [Электронный ресурс]. URL: [http://energy.komisc.ru/dev/test\\_cases#Link\\_3](http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3) (дата обращения 22.01.2021).



I.A. Lipuzhin

## IEEE & CIGRE BENCHMARK SYSTEMS FOR POWER SYSTEM STUDIES

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

**Abstract:** The article discusses the concept of "benchmark" or "test" system, which can be used in the power system studies, both traditional and with the presence of distributed energy sources. The description of the main test systems developed by the international organizations IEEE and CIGRE are given, and the sources are indicated in which their parameters are given. A list of the main tasks, in the solution of which test systems can be used, are indicated.

**Key words:** test system, benchmark systems, network benchmark, IEEE, CIGRE.

### References

- [1] C. Grigg et al., "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010–1020, Aug. 1999, doi: 10.1109/59.780914.
- [2] *IEEE RTS 24-bus case*, The Data Repository for Power system Open models With Evolving Resources (DR POWER). [Online]. Available at: <https://eGRIDdata.org/dataset/ieee-rts-24-bus-case> [Accessed: Apr. 26, 2021].
- [3] H.E. Pierce et al., "Common format for exchange of solved load flow data", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 6, pp. 1916-1925, Nov. 1973, doi: 10.1109/TPAS.1973.293571.
- [4] *Power Cases*, Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG). [Online]. Available at: <https://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/> [Accessed: Apr. 24, 2021].
- [5] *Power systems test case archive*, University of Washington. [Online]. Available at: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> [Accessed: March 20, 2021].
- [6] P. Demetriou, M. Asprou, J. Quiros-Tortos and E. Kyriakides, "Dynamic IEEE test systems for transient analysis", *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 2108-2117, Dec. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2444893.
- [7] *Dynamic IEEE Test Systems*, KIOS Research Center for Intelligent Systems and Networks of the University of Cyprus. [Online]. Available at: <https://www2.kios.ucy.ac.cy/testsystems/> [Accessed: Apr. 20, 2021].
- [8] *Resources*, IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. [Online]. Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> [Accessed: Apr. 25, 2021].
- [9] T. Van Cutsem et al., "Test systems for voltage stability studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 4078-4087, Sept. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2976834.
- [10] *Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment*, Power System Dynamic Performance Committee [Online]. Available at: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/489-2/> [Accessed: Apr. 22, 2021].
- [11] C. Canizares et al., "Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2561263.
- [12] *Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control*, Power System Dynamic Performance Committee. [Online]. Available at: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/benchmark-systems-2/> [Accessed: Apr. 22, 2021].
- [13] T.K. Vrana, Y. Yang, D. Jovcic, S. Denetière, J. Jardini and H. Saad, "The CIGRE B4 DC grid test system", *Electra*, vol. 270, no. 9, pp. 10–19,

- 2013.
- [14] “*Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources*”, CIGRE Task Force C6.04.02, Technical Brochure 575, 2014, 119 p. [Online]. Available at: <https://e-cigre.org/publication/575-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-energy-resources> [Accessed: July 20, 2020].
- [15] S. Peyghami, P. Davari, M. Fotuhi-Firuzabad and F. Blaabjerg, “Standard test systems for modern power system analysis: An Overview”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 86-105, Dec. 2019, doi: 10.1109/MIE.2019.2942376.
- [16] T. Van Cutsem et al., “*Test systems for voltage stability analysis and security assessment*”, IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, Tech. Rep. PES-TR19, Aug. 2015. [Online]. Available at: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/technical-publications/technical-reports/PESTR19.html> [Accessed: Apr. 22, 2021].
- [17] C. Canizares et al., “*Benchmark systems for small-signal stability analysis and control*”, IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, Tech. Rep. PES-TR18, Aug. 2015, 390 p. [Online]. Available at: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PESTR18.html> [Accessed: Apr. 22, 2021].
- [18] M. Szechtman et al., “The CIGRE HVDC Benchmark Model: A new proposal with revised parameters”, *Electra*, no. 157, pp. 61–67, Dec. 1994.
- [19] *PSS®E – high-performance transmission planning and analysis software*, Siemens. [Online]. Available at: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/pss-e.html> [Accessed: May 06, 2021].
- [20] *PSAT*, Prof. Federico Milano's Website. [Online]. Available at: <http://faraday1.ucd.ie/psat.html> [Accessed: May 07, 2021].
- [21] *MATPOWER*. [Online]. Available at: <https://matpower.org/> [Accessed: May 07, 2021].
- [23] *Nossos produtos [Our products]*, CEPEL. Departamento de Redes Eléctricas [CEPEL. Electrical Networks Department]. [Online]. Available at: <https://dre.cepel.br/Programa> [Accessed: May 12, 2021] (in Portuguese).
- [24] *IEEE Benchmarks*, Manitoba Hydro International Ltd. [Online]. Available at: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-51/v-> [Accessed: May 13, 2021].
- [25] *Power system test cases*, Fraunhofer IEE and University of Kassel. [Online]. Available at: [https://pandapower.readthedocs.io/en/v2.6.0/networks/power\\_system\\_test\\_cases.html#pandapower.networks.case2848rte](https://pandapower.readthedocs.io/en/v2.6.0/networks/power_system_test_cases.html#pandapower.networks.case2848rte) [Accessed: May 16, 2021].
- [26] C. Jozs, S. Fliscounakis, J. Maenght and P. Panciatici, “AC power flow data in MATPOWER and QCQP format: iTesla, RTE snapshots, and PEGASE”, 2016. [Online]. Available at: <https://arxiv.org/abs/1603.01533> [Accessed: May 16, 2021].
- [27] *IEEE Common Data Format*, University of Washington. [Online]. Available at: <http://www.ee.washington.edu/research/psca/formats/cdf.txt> [Accessed: March 13, 2021].
- [28] *Testovye skhemy [Test systems]*, Otdel energetiki ISEiEPS Komi NC UrO RAN [Energy Department ISEiEPS Komi Scientific Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. [Online]. Available at: [http://energy.komisc.ru/dev/test\\_cases#Link\\_3](http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3) [Accessed: Jan. 22, 2021] (in Russian).

А.А. Лоскутов, Ю.С. Шальнов

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 110 КВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассмотрены распределенные средства продольной компенсации, устанавливаемые по всей длине ЛЭП, а именно малогабаритные устройства продольной компенсации. Выявлены основные преимущества использования МУПК, монтируемых на проводах ВЛ. С помощью программного комплекса PSCAD рассмотрено применение УПК в электрической сети 110 кВ. Получены результаты по увеличению пропускной способности ВЛ и улучшению статической устойчивости узла нагрузки электрической сети путем повышения напряжения на конце электропередачи.

**Ключевые слова:** малогабаритные устройства продольной компенсации, устойчивость электрической сети, повышение пропускной способности ЛЭП, FACTS, имитационное моделирование, PSCAD.

### Введение

В России возрастают требования к максимальному использованию пропускной способности электрических сетей с целью повышения эффективности работы уже существующих линий электропередач, что может обеспечиваться с помощью управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока.

Передача энергии ведется по проводам, а значит максимальная передаваемая мощность будет зависеть от параметров линии. Строительство дополнительных высоковольтных линий может обойтись высокими затратами, следовательно, нужно увеличивать пропускную способность уже имеющихся линий, а также уделить внимание повышению устойчивости электрических систем.

Целесообразно внедрять в электрические системы и сети установки по компенсации реактивной мощности и компенсации индуктивного сопротивления, что является очевидным уже на этапе технико-экономической разработки плана развития сетевого района.

В России пока не получили широкого распространения устройства FACTS. Это связано с длительным сроком сооружения, высокой стоимостью и необходимостью отведения значительных площадей для размещения.

Распределенные малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК) [1-5,8,10,11] могут быть альтернативным вариантом традиционным устройствам FACTS. Данный класс устройств за счёт управляемого воздействия на реактивную составляющую сопротивления воздушной линии (ВЛ) может осуществлять изменение их пропускной способности, обеспечивая оптимальное

перераспределение потоков мощности между перегруженными и недогруженными линиями.

Способность МУПК влиять на перераспределение потоков мощности в линиях электропередачи, а также возможность изменения параметров и режимов работы данных устройств в темпе процесса (в режиме реального времени) позволяет рассматривать их в качестве эффективного технического инструмента как для существующих, так и для перспективных интеллектуальных электрических сетей.

### Требования к устойчивости энергосистем

Для рассмотрения результатов применения устройств УПК нужно обратить внимание на параметры устойчивости и коэффициентов, с помощью которых возможно определять степень статической устойчивости рассматриваемых участков сети.

Статическая устойчивость – способность системы восстанавливать исходный режим работы после малого его возмущения, или близкий к исходному, если возмущающее воздействие не снято.

В данной работе рассматривается улучшение статической устойчивости системы 110/10 кВ, для этого требуется ввести оценочные показатели устойчивости, которыми являются [6]:

- 1) минимальный коэффициент запаса статической аперiodической устойчивости по активной мощности в контролируемых сечениях ( $K_p$ );
- 2) минимальный коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки ( $K_u$ ).

В данной статье рассмотрено влияние УПК на коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки.

Таблица 1

Значения коэффициентов устойчивости

Электроэнергетический режим ЭС	$K_u, min$
Нормальный	0,15
Послеаварийный	0,10
Вынужденный	0,10

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки ( $K_u$ ) определяется по формуле:

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U_{кр}}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение в узле нагрузки в рассматриваемом режиме, кВ;

$U_{кр}$  – критическое напряжение в узле нагрузки, кВ.

Критическое напряжение в узлах нагрузки соответствует границе статической устойчивости электродвигательной нагрузки и определяется на основании фактических данных, предоставленных потребителем электрической энергии.

При отсутствии данных критическое напряжение следует принимать равным [6]:

$$U_{кр} = 0,7 \cdot U_{ном}, \quad (2)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение электрической сети, кВ.

Исходя из ГОСТ 32144-2013 о нормах качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [7], предназначенного для регулирования напряжения в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Таким образом, для сети 110 кВ минимальное и максимальное значения напряжений соответствуют:

$$U_{min} = U_{ном} \cdot 0,9 = 110 \cdot 0,9 = 99 \text{ кВ} \quad (3)$$

$$U_{max} = U_{ном} \cdot 1,1 = 110 \cdot 1,1 = 121 \text{ кВ} \quad (4)$$

В сети 110 кВ  $U_{кр}$  равно:

$$U_{кр} = 0,7 \cdot 110 = 77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Так как значение  $K_u$  минимальное в нормальном режиме равно 0,15, тогда напряжение в сети 110 кВ, при котором достигается данная величина вычисляется из формулы (1):

$$U = K_U \cdot U_{кр} + U_{кр} = 0,15 \cdot 77 + 77 = 88,55 \text{ кВ}$$

Получив критическое напряжение по статической устойчивости узла нагрузки, следует рассчитать  $K_u$  для допустимого минимального, максимального и для номинального напряжений, определяемый выше по нормам качества электроэнергии:

$$K_{U_{min}} = \frac{99 - 77}{77} = 0,286; \quad (6)$$

$$K_{U_{max}} = \frac{121 - 77}{77} = 0,571; \quad (7)$$

$$K_{U_{ном}} = \frac{110 - 77}{77} = 0,429. \quad (8)$$

Таким образом, имеется диапазон изменения  $K_u$ , относительно которого будут сравниваться полученные значения в рассматриваемых режимах работы УПК.

### Малогабаритные устройства продольной компенсации

МУПК основано на технологии Smart Wire (умный провод) [8] и обеспечивают управляемое воздействие на реактивную составляющую сопротивления ЛЭП.

Основными эффектами от применения МУПК являются:

- 1) перераспределение мощности между отдельными параллельно

- работающими линиями или сечениями;
- 2) повышение пропускной способности;
- 3) повышение устойчивости и надежности работы;
- 4) уменьшение потерь энергии.

Массогабаритные характеристики устройств позволяют размещать их на линиях электрических передач. При этом управляемые элементы распределяются вдоль всего маршрута размещения МУПК. Таким образом, появляется возможность различной компоновки устройств компенсации реактивной мощности по всему рассматриваемому участку электрической сети.

Размещение МУПК на проводах позволяет не использовать высоковольтную изоляцию ввиду значительного удаления от поверхности земли, что влияет на стоимость устройств.

Одним из главных преимуществ является конструктивное исполнение, позволяющее без разрыва проводов монтировать устройства на воздушные линии, а значит возможно применение не только на новых ЛЭП, но и на работающих участках электрических сетей. Также важным пунктом является высокая мобильность устройств и их демонтаж [8].

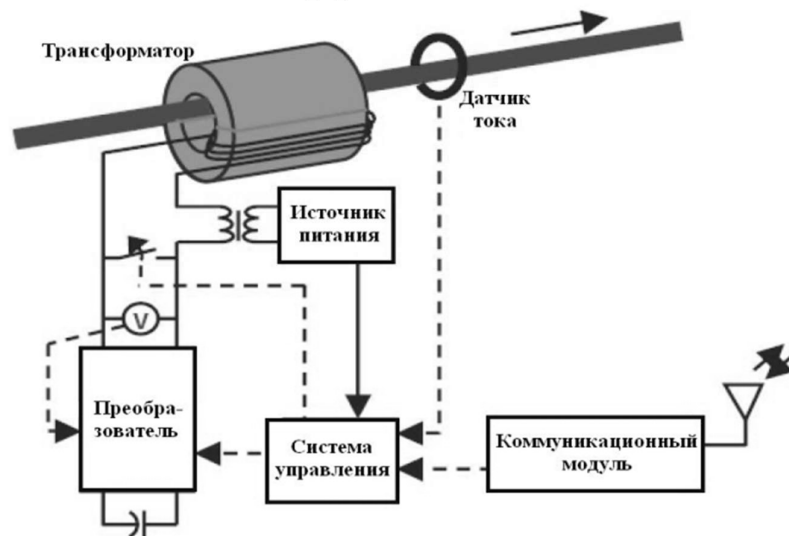


Рис. 1. Обобщенная структура МУПК

Подключение емкости к вторичной обмотке приводит к образованию колебательного контура, вторым элементом которого является индуктивность намагничивания силового трансформатора. В зависимости от соотношения емкости, приведенной к первичной обмотке, и индуктивности намагничивания трансформатора может наблюдаться два разных влияния на выходное реактивное сопротивление контура.

### Моделирование применения УПК в сети 110 кВ

Для рассмотрения эффектов от применения МУПК в программном комплексе PSCAD произведено моделирование эквивалентного по принципу влияния на электрические параметры системы устройства продольной компенсации (УПК). Модель электрической сети с УПК представлена на рис. 2.

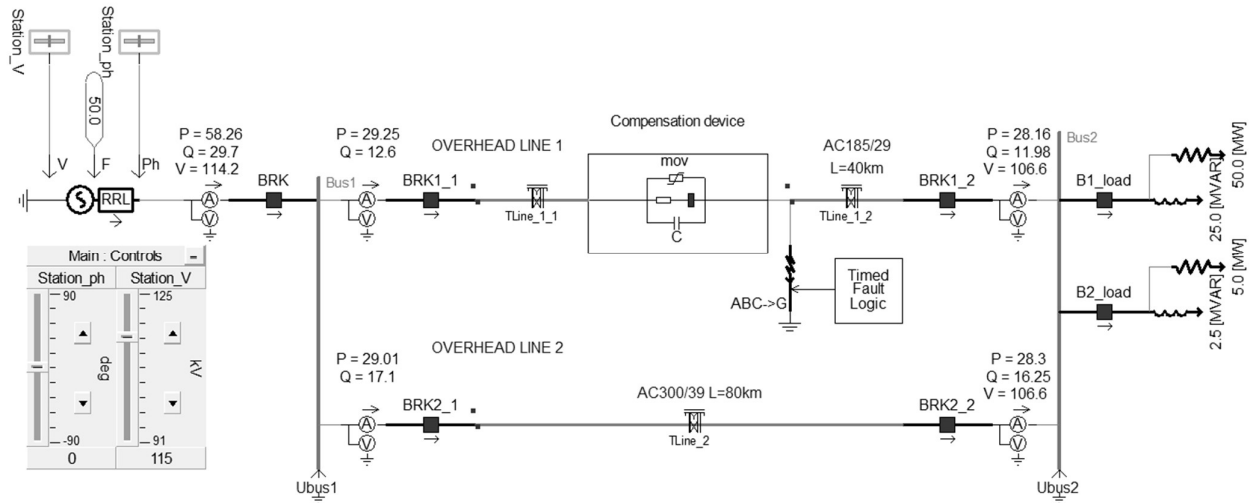


Рис. 2. Электрическая сеть с УПК

Параметры элементов имитационной модели представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры элементов имитационной модели

Параметр	Ед. изм.	Значение	
<i>Источник</i>			
Базовое напряжение	кВ	115	
Импеданс	Ом	2,66 ∠ 88°	
<i>Нагрузка</i>			
		<i>P</i>	<i>Q</i>
Нагрузка-1 ( B1 load)	МВт, Мвар	50	25
Нагрузка-2 ( B2 load)	МВт, Мвар	5	2,5
Нагрузка-3 ( B3_load)	МВт, Мвар	5	2,5
<i>Воздушные линии электропередачи</i>			
		ВЛ-1	ВЛ-2
Марка и сечение провода	-	185/29	300/39
Удельное активное сопротивление	Ом/км	0,1591	0,0958
Среднегеометрическое расстояние между фазами	м	13,572	13,572
Диаметр провода	мм	18,8	21,6
Удельное реактивное сопротивление	Ом/км	0,472	0,464
Удельная емкостная проводимость	мкСм/км	2,399	2,446
Длина ЛЭП	км	80	80
Полное активное сопротивление линии	Ом	12,728	7,664
Полное индуктивное сопротивление ВЛ	Ом	37,780	37,083
Полная емкостная проводимость линии	мкСм	191,928	195,662

В данной модели рассмотрен метод защиты с помощью варистора и токоограничивающей ветви. Проверка работы будет осуществлена с помощью моделирования короткого замыкания на линии, где установлено устройство компенсации.

Модель УПК состоит из четырех ветвей, включающих в себя варистор, конденсатор, токоограничивающую ветвь, и ветвь для режима отключения УПК из работы [4].

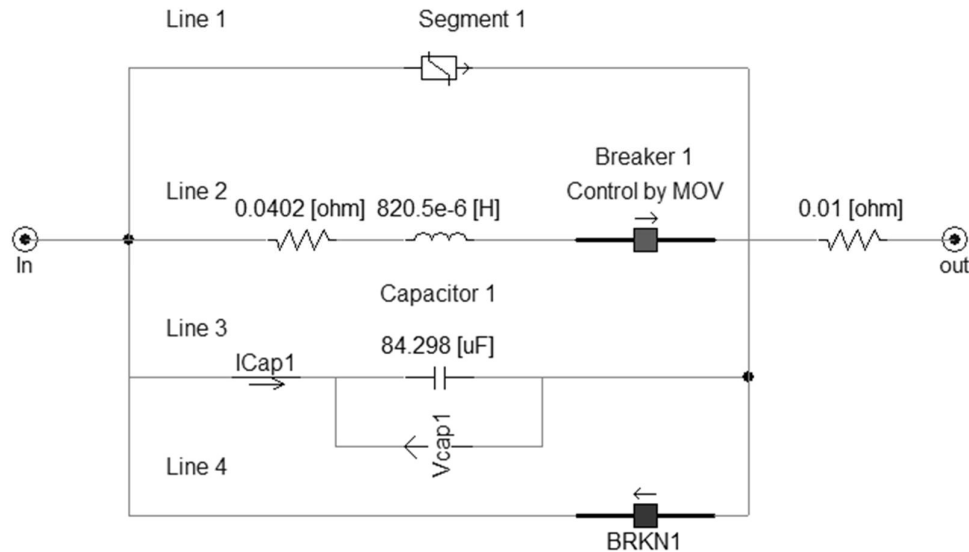


Рис. 3. Модель УПК

Главным элементом модели УПК является конденсатор. Его емкость подбирается в зависимости от сопротивления линии и нужной компенсации. Данные представлены в табл. 3.

### Методика расчета емкости УПК

Для моделирования УПК на воздушных линиях нужно рассчитать емкость конденсаторной батареи, которая приводит к изменению индуктивной составляющей сопротивления воздушной линии. Сопротивление ВЛ состоит из активной и индуктивной составляющих. В таблице 2 рассчитаны параметры для ВЛ-1 и ВЛ-2.

УПК способно изменять реактивное сопротивление ВЛ в соответствии с выражением:

$$X_{ВЛ} = X_L - X_C, \quad (9)$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление ВЛ,  $X_C$  – емкостное сопротивление, вносимое УПК.

Таким образом, с помощью УПК возможно изменять реактивное сопротивление ВЛ, что влияет на снижение потерь напряжения на участке ВЛ:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_{ном}}, \quad (10)$$

где  $P$  – активная мощность,  $Q$  – реактивная мощность,  $R$  – активное сопротивление ВЛ,  $U_{ном}$  – номинальное напряжение.

Находим нужное емкостное сопротивление в зависимости от того, на сколько процентов нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ:



$$X_C = k_{\text{сопр}} \cdot X_L, \tag{11}$$

где  $k_{\text{сопр}}$  – коэффициент сопротивления, зависит от процента снижения индуктивной составляющей сопротивления ВЛ.

Коэффициент сопротивления выбирается в зависимости от того, на какую величину нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ.

Далее определяется емкость конденсатора:

$$C = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot X_C}, \tag{12}$$

после чего полученные емкости вводятся в устройство УПК.

Таблица 3

**Параметры УПК при различном проценте изменения индуктивного сопротивления ВЛ**

$k_{\text{сопр}}$	Вводимое $X_C$ , Ом	$C$ , мкФ
0%	0	0
20%	7,552	421,491
40%	15,104	210,745
60%	22,656	140,497
80%	30,208	105,373
100%	37,76	84,298

Таким образом, для получения итогового сопротивления ВЛ при включении УПК, нужно из индуктивного сопротивления ВЛ (таблица 2) вычесть вводимое емкостное сопротивление, как это показано в формуле (9).

**Работа УПК при включенной одной ВЛ-1 110 кВ**

Рассмотрим режим при работе одной ВЛ 110 кВ (рис.2). Емкость УПК выбирается в зависимости от сопротивления ЛЭП. Обычно, конденсаторы применяются для компенсации от 25% до 75% индуктивного сопротивления линии электропередачи [9]. При моделирования произведены изменения сопротивления от 20% до 100%.

Произведен расчет сети без применения УПК для рассмотрения начальных значений напряжения, мощностей и токов без воздействия конденсаторов.

При нормальном режиме работы без УПК ток в линии составляет 308А, напряжение на узле нагрузки 98,07 кВ, что ниже порога по допустимому минимальному напряжению в соответствии с [7]. Соответственно, нужно повысить напряжение на конце передачи с помощью УПК.

Далее приведено изменение тока в линии при изменении индуктивного сопротивления ВЛ-1, при этом провод АС 185/29 имеет длительно-допустимый ток 510 А.

Таблица 4

## Изменение тока линии электропередачи 110 кВ при работе УПК

$X_{ВЛ-1}$ , Ом	Вводимое сопротивление УПК	Ток ЛЭП, А	Процент загрузки по току
37,76	$X_c=0\%$	308	60,39%
30,208	$X_c=20\%$	315	61,76%
22,656	$X_c=40\%$	321	62,94%
15,104	$X_c=60\%$	327	64,12%
7,552	$X_c=80\%$	333	65,29%
0	$X_c=100\%$	339	66,47%

Как видно из таблицы, при уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК, ток повышается, соответственно, процент загрузки по току повышается на 6,08%.

Таблица 5

## Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК

$X_{ВЛ-1}$ , Ом	Вводимое сопротивление УПК	Напряжение, кВ	$K_u$
37,76	$X_c=0\%$	98,07	0,274
30,208	$X_c=20\%$	100,1	0,300
22,656	$X_c=40\%$	102	0,325
15,104	$X_c=60\%$	103,9	0,349
7,552	$X_c=80\%$	105,7	0,373
0	$X_c=100\%$	107,5	0,396

При внедрении УПК на 100% наблюдается увеличение среднеквадратичного значения напряжения с 98,07кВ до 107,5кВ, что способствовало уменьшению снижения напряжения ниже установленных в [7] значений при дополнительной нагрузке сети. При внедрении УПК на 20% уже имеет место увеличение напряжения с 98,07 кВ до 100,1 кВ, что входит в допустимые значения по [7].

Также увеличен коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению при максимальной работе УПК с 0,274 до 0,396 (на 30,8%). При том, что минимальное значение коэффициента при допустимых уровнях напряжения (99 кВ) составляет 0,286 (6).

Исходя из данных можно сделать вывод, что передаваемая активная мощность увеличивается с уменьшением индуктивного сопротивления

При снижении индуктивного сопротивления наблюдается повышение передачи активной мощности по концу ВЛ-1, что благоприятно сказывается как на потребителе, так и на устойчивости узла нагрузки. Процент увеличения активной

нагрузки при УПК 20% равен 3,9% (1,94 МВт), при УПК 100% равен 16,66% (9,55 МВт).

Таблица 6

Параметры активной мощности при применении УПК

Изменение емкостного сопротивления $X_C$	Начало ВЛ-1			Конец ВЛ-1		
	$P$ без УПК, МВт	$P$ с УПК, МВт	$P$ , МВт	$P$ без УПК, МВт	$P$ с УПК, МВт	$P$ , МВт
0%	51,57	51,57	0	47,76	47,76	0
20%	51,57	53,64	2,07	47,76	49,7	1,94
40%	51,57	55,71	4,14	47,76	51,61	3,85
60%	51,57	57,78	6,21	47,76	53,53	5,77
80%	51,57	59,84	8,27	47,76	55,44	7,68
100%	51,57	61,86	10,29	47,76	57,31	9,55

сказывается как на потребителе, так и на устойчивости узла нагрузки. Процент увеличения активной нагрузки при УПК 20% равен 3,9% (1,94 МВт), при УПК 100% равен 16,66% (9,55 МВт).

Таблица 7

Параметры реактивной мощности при применении УПК

Изменение емкостного сопротивления $X_C$	Начало электропередачи			Конец электропередачи		
	$Q$ без УПК, Мвар	$Q$ с УПК, Мвар	$\Delta Q$ , Мвар	$Q$ без УПК, Мвар	$Q$ с УПК, Мвар	$\Delta Q$ , Мвар
0%	32,61	32,61	0	23,87	23,87	0
20%	32,61	31,69	-0,92	23,87	24,84	0,97
40%	32,61	30,58	-2,03	23,87	25,8	1,93
60%	32,61	29,3	-3,31	23,87	26,76	2,89
80%	32,61	27,83	-4,78	23,87	27,71	3,84
100%	32,61	26,17	-6,44	23,87	28,65	4,78

Исходя из данных можно сделать вывод, что реактивная мощность повышается в конце линии на 4,78 Мвар, что составляет 16,66%, но при этом наблюдается снижение в начале электропередачи на 6,44 Мвар, составляет 24,6%, следовательно, линией потребляется меньше реактивной мощности.

Таким образом, при работе ВЛ-1 с УПК повышается передаваемая активная мощность и увеличивается уровень напряжения в конце передачи, что способствует улучшению коэффициента запаса статической устойчивости по напряжению.

Работа УПК при включенных двух параллельных ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ

Рассмотрим режим при работе двух параллельных ВЛ-1 с проводом АС 185/29 и ВЛ-2 с проводом АС 300/39. УПК устанавливается на ВЛ-1.

Таблица 8

## Изменение тока в ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

$X_{ВЛ-1}$ , Ом	видимое сопротивление УПК	Ток ВЛ-1, А	Процент загрузки по току ВЛ-1	Ток ВЛ-2, А	Процент загрузки по току ВЛ-2
37,76	$X_c=0\%$	161	31,57%	170	23,94%
30,2	$X_c=20\%$	179	35,10%	154	21,69%
22,65	$X_c=40\%$	200	39,22%	136	19,15%
15,1	$X_c=60\%$	227	44,51%	116	16,34%
7,552	$X_c=80\%$	261	51,18%	98	13,80%
0	$X_c=100\%$	303	59,41%	97	13,66%

Как видно из таблицы, при уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК на 100%, ток повышается с 161А до 303А (с 31,57% до 59,41% загрузки по току), а в ВЛ-2 наблюдается снижение с 170 А до 97А (с 23,94% до 13,66% загрузки по току).

Таблица 9

## Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

$X_{ВЛ-1}$ , Ом	видимое сопротивление УПК	Напряжение, кВ	$K_u$
37,76	$X_c=0\%$	106,7	0,386
30,2	$X_c=20\%$	107,1	0,391
22,65	$X_c=40\%$	107,4	0,395
15,1	$X_c=60\%$	107,8	0,400
7,552	$X_c=80\%$	107,9	0,401
0	$X_c=100\%$	107,9	0,401

При применении УПК на участке с двумя параллельными ВЛ, изменение напряжения на конце электропередачи незначительно. Уровень напряжения на конце электропередачи при работе двух ВЛ-1 и ВЛ-2 (106,7кВ) выше, чем при работе одной ВЛ-1 (98,07кВ) на 8,63кВ, что уже предотвращает снижение напряжения до недопустимых значений. Изменение коэффициента запаса статической устойчивости так же является незначительным с 0,386 до 0,401.

Рассмотрим изменение передаваемой мощности.

Из таблицы 10 видно, что при изменении сопротивления ВЛ-1 с помощью УПК наблюдается переток мощности между параллельными ВЛ-1 и ВЛ-2.

Данные результаты нужно применять в сетевых районах, где наблюдается превышение загрузки одной из ВЛ, для этого с помощью УПК возможно изменить сопротивление ВЛ и изменить переток мощности, чтобы разгрузить перегруженную ВЛ.

Таблица 10

Параметры активной и реактивной мощности при УПК в ВЛ-1

Изменение емкостного сопротивления $X_C$	Активная мощность ( $P$ ), МВт			Реактивная мощность ( $Q$ ), Мвар		
	ВЛ-1	ВЛ-2	$\Delta$	ВЛ-1	ВЛ-2	$\Delta$
0%	28,16	28,3	0,14	11,98	16,25	4,27
20%	31,65	25,22	-6,43	12,33	16,1	3,77
40%	35,96	21,3	-14,66	12,43	16,2	3,77
60%	41,33	16,27	-25,06	12,11	16,69	4,58
80%	48,02	9,741	-38,279	10,96	17,92	6,96
100%	56,19	1,304	-54,886	8,184	20,56	12,376

Из таблицы 10 видно, что при изменении сопротивления ВЛ-1 с помощью УПК наблюдается переток мощности между параллельными ВЛ-1 и ВЛ-2.

Данные результаты нужно применять в сетевых районах, где наблюдается превышение загрузки одной из ВЛ, для этого с помощью УПК возможно изменить сопротивление ВЛ и изменить переток мощности, чтобы разгрузить перегруженную ВЛ.

**Моделирование устройства защиты УПК от короткого замыкания**

Последовательные конденсаторы подвергаются воздействию широкого диапазона токов, что может привести к возникновению больших напряжений на конденсаторах. При коротких замыканиях ток и напряжение на выводах конденсаторов резко возрастают. Во избежание пробоя конденсаторов они должны быть защищены специальным оборудованием.

Таким образом, для предотвращения выхода из работы УПК важно обратить внимание на вопрос защиты конденсатора от перенапряжений при аварийных ситуациях в сетевом районе.

Модель PSCAD предусматривает защиту УПК от перенапряжений с помощью варистора (рис. 3).

На ВЛ-1 смоделировано короткое замыкание в момент времени 2 секунды. Это приведет к увеличению напряжения на конденсаторе.

Устройство защиты становится активным, когда напряжение конденсатора пытается превысить защитный уровень. В ответ варистор ограничит напряжение конденсатора на защитном уровне и не позволит ему возрасти.

На рис. 4 изображено КЗ в момент времени 2 секунды и процесс защиты конденсатора.

При превышении напряжения на конденсаторе ( $V_{cap1}$ ) варистор начинает менять свою вольтамперную характеристику и подавать ток в противофазе для уменьшения тока через конденсатор. Когда один из сигналов энергии или тока превышает допустимое значение на варисторе (*engal* и *curral*), тогда включается в работу выключатель второй цепи, который перенаправляет ток КЗ от варистора. На графиках момент включения в работу выключателя второй ветви

показан как  $B_{pal}$  (рис. 4). Катушка индуктивности ограничивает выбросы высокочастотных токов, а резистор обеспечивает дополнительное демпфирование.

Напряжение на конденсаторе ( $V_{cap1}$ ) ограничивается до тех пор, пока напряжение превышает допустимое значение, когда значение напряжения перестает превышать допустимую границу, тогда варистор перестает ограничивать ток, как видно по графику  $Curr1$  ток перестает подаваться варистором. На  $V_{cap1}$  наблюдается затухание напряжения до нормальных значений.

После того, как было выполнено ограничение перенапряжения, наблюдается высокий ток на  $I_{cap1}$  (ток через выключатель второй линии), имеющий затухающий характер. Вместе с тем затухает напряжение, которое было ограничено ранее.

Таким образом, задача защиты конденсатора от перенапряжения выполняется.

### Заключение

Таким образом, можно выявить два ключевых момента в использовании УПК на имитационной модели PSCAD с двумя воздушными линиями и одним узлом нагрузки.

1. При внедрении УПК на 100% в электрическую систему с работой одной ВЛ-1, наблюдается:

- увеличение активной передаваемой мощности с 47,76 до 57,31 МВт, что составляет увеличение на 16,66%;
- напряжение узла нагрузки увеличилось с 98,07 кВ до 107,5 кВ;
- снижение реактивной мощности в начале ВЛ-1 на 6,44 Мвар, что составляет 24,6%;
- повышение коэффициента статической устойчивости по напряжению с 0,274 до 0,396.

Данные при применении УПК при одной воздушной линии показывают увеличение передаваемой мощности, повышение напряжения на узле нагрузки, значительное уменьшение потребляемой реактивной мощности электропередачей и улучшение статической устойчивости, что подтверждает теоретические данные по основным преимуществам УПК.

2. Рассматривая применение УПК на участке с двумя ВЛ-1 и ВЛ-2 при установке компенсации на ВЛ-1, стоит отметить, что изменения передаваемой мощности не столь значительны, как при одной ВЛ-1.

Изменяя сопротивление одной из ВЛ, наблюдается переток мощности от одной к другой линии. Данный метод помогает разгружать перегруженные ВЛ и регулировать потоки мощности в сетевом районе. Например, при превышении загрузки ВЛ можно наблюдать зависимость перетока мощности, а также величины тока, проходящего по двум ВЛ

Рассматривая данные по току до применения УПК, ток первой ВЛ составлял 161 А, на второй – 170 А. Если нужно разгрузить ВЛ-2, тогда, благодаря работе УПК на 100%, ток на ВЛ-1 возможно увеличить до 303 А, а на второй линии уменьшать до 97 А. Следовательно, есть возможность изменять переток мощности в линиях, не допуская при этом перегрузки одной и недогрузки второй ВЛ.

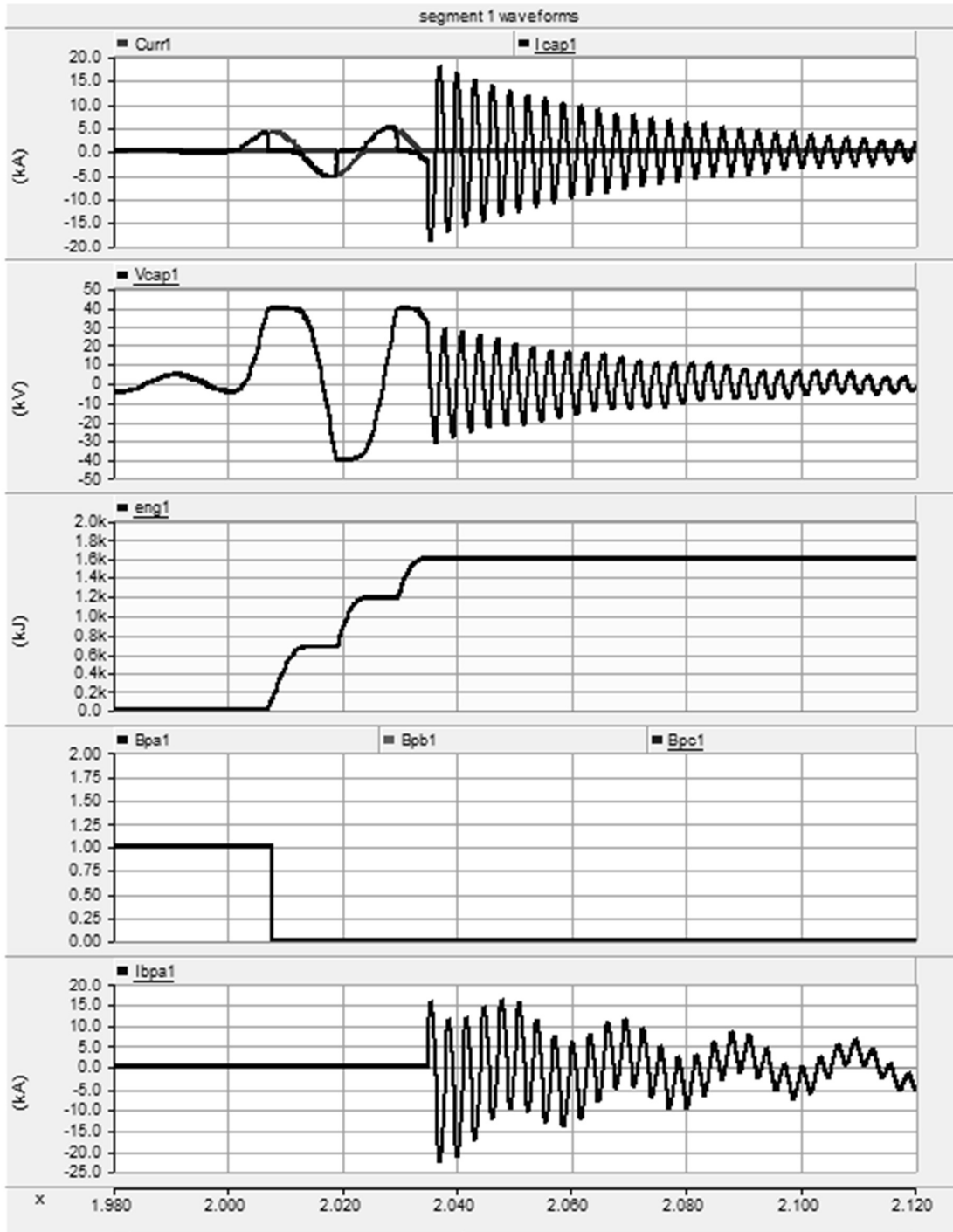


Рис. 4. Осциллограммы при работе защиты во время КЗ

УПК влияет на параллельные ВЛ по большей мере тем, что способствует регулированию перетоков мощности между линиями передачи. Такое свойство полезно, если определенные линии загружены достаточно сильно, по сравнению с другими.

К примеру, согласно практике ведения режимов АО «СО ЕЭС» для ЛЭП, загрузка которых более чем 75 процентов от максимально допустимых значений токов в нормальном режиме, требуется дополнительный контроль.

#### Библиографический список

1. **Панфилов, Д.И.** Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Д.И. Панфилов, Ю.Г. Шакарян, М.Г. Асташев, П.А. Рашитов, А.В. Антонов // *Электротехника*, №7-2017, стр. 78-82.
2. **Асташев, М.Г.**, Применение двухтактного преобразователя в малогабаритном устройстве распределённой продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / М.Г. Асташев, Д.И. Панфилов, П.А. Рашитов, А.Н. Рожков // *Известия РАН. Энергетика*, 2016 №4.
3. M.G.Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, A.N. Rozhkov, D.A Seregin. "Automated Control Unit of Power Flow in Intellectual Electricity Distribution Network". Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development. 2016 Springer International Publishing, Chapter 17. ISBN:978-3-319-62869-1. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7, October 17, 2017, 737 pp.
4. **Лачугин, В.Ф.** Малогабаритные устройства продольной компенсации и оценка их влияния на параметры срабатывания устройств релейной защиты ВЛ 220 кВ / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев, А.С. Мурачев, П.С. Платонов // *Известия РАН, «Энергетика»*, 2018 г.
5. Панфилов Д.И., Асташев М.Г. «Устройство продольной компенсации для линий электропередачи». Патент №2683784 от 02.04.2019, опубл. 02.04.2019, бюлл. №10.
6. Методические указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018г. №630.
7. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва, Стандартинформ, 2014.
8. **Панфилов, Д. И.** Исследование и разработка опытного образца малогабаритного устройства распределенной продольной компенсации для ЛЭП 220кВ с выбором и обоснованием пилотного объекта внедрения. ОАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г.М. КРЖИЖАНОВСКОГО» Д. И. Панфилов, М. Г. Асташев, В. Ф. Лачугин. - Москва, 2016.
9. PSCAD Cookbook/ Series Compensation Study/ Powered by Manitoba Hydro International Ltd. – R3P 1A3 Canada, 2018.
10. Dheeraj Kumar Dhaked and Mahendra Lalwani. A comprehensive re-view on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC) – Department of Electrical Engineering, Rajasthan Technical University, Kota, India, 2017.
11. Mark Laufenberg. D-FACTS Devices in Power World Simulator. – Power World Corporation, 2014.



A.A. Loskutov, Y.S. Shalnov

## RESEARCH OF THE STABILITY OF 110 KV ENERGY SYSTEM USING WITH SMALL LONGITUDINAL COMPENSATION DEVICES FOR AIR LINE

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

**Abstract:** The article discusses the distributed means of longitudinal compensation installed along the entire length of the transmission line, namely, small-sized longitudinal compensation devices (SLCD). The main advantages of using SLCDs mounted on overhead lines are revealed. Using the PSCAD software package, the application of the compensation devices in the 110 kV electrical network is considered. Results were obtained to increase the transmission capacity of overhead lines and improve the static stability of the load node of the electrical network by increasing the voltage at the end of the transmission.

**Key words:** small-sized longitudinal compensation devices, electrical grid stability, increasing transmission line capacity, FACTS, simulation, PSCAD.

### References

- [1] Panfilov D.I., Shakaryan Yu.G., Astashev M.G., Rashitov P.A., Antonov A.V. "Small-sized longitudinal compensation devices for overhead power lines", *Electrical Engineering*, No. 7-2017, pp. 78-82.
- [2] Astashev M.G., Panfilov D.I., Rashitov P.A., Rozhkov A.N. "Application of a push-pull converter in a small-sized device for distributed longitudinal compensation for overhead power lines" *Izvestiya RAS. Energy*, 2016 No. 4.
- [3] M.G. Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, A.N. Rozhkov, D. A. Seregin. "Automated Control Unit of Power Flow in Intellectual Electricity Distribution Network". *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development. 2016 Springer International Publishing, Chapter 17.* ISBN: 978-3-319-62869-1. DOI: 10.1007 / 978-3-319-62870-7, October 17, 2017 , 737 pp.
- [4] Lachugin V.F., Panfilov D.I., Astashev M.G., Murachev A.S., Platonov PS. "Small-sized devices of longitudinal compensation and assessment of their influence on the parameters of operation of relay protection devices for overhead lines 220 kV." *Izvestia RAS, "Energetika"*, 2018
- [5] Panfilov DI, Astashev MG "Longitudinal compensation device for power transmission lines". Patent No. 2683784 dated 02.04.2019, publ. 02.04.2019, bull. No. 10.
- [6] Guidelines for the sustainability of power systems. Approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated 03.08.2018. No. 630.
- [7] GOST 32144-2013 Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. - Moscow, Standardinform, 2014.
- [8] Panfilov DI, Astashev MG, Lachugin VF Research and development of a prototype of a small-sized device for distributed longitudinal compensation for 220 kV transmission lines with the selection and justification of a pilot implementation object. JSC "ENERGY INSTITUTE named after G.M. KRZHIZHANOVSKY ". - Moscow, 2016.
- [9] PSCAD Cookbook / Series Compensation Study / Powered by Manitoba Hydro International Ltd. - R3P 1A3 Canada, 2018.
- [10] Dheeraj Kumar Dhaked and Mahendra Lalwani. A comprehensive re-view on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC) - Department of Electrical Engineering, Rajasthan Technical University, Kota, India, 2017.
- [11] Mark Laufenberg. D-FACTS Devices in Power World Simulator. - Power World Corporation, 2014.

А.Б. Лоскутов, А.С. Панкова, О.А. Пронина

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья описывает новый подход к построению распределительных электрических сетей по гексагональному принципу, в котором функции управления осуществляются децентрализованно в универсальных узлах нагрузки. Предложен универсальный алгоритм принятия решения по воздействию на выключатели в зависимости от изменения нагрузки в сети.

**Ключевые слова:** гексагональная сеть дифференциальная защита; алгоритм, PSCAD, система управления.

Современные энергетические системы находятся в процессе непрерывного развития, которое приводит к возникновению сложных взаимосвязанных сетей. В этой ситуации традиционные системы защиты не всегда могут удовлетворить потребности в надежности и бесперебойности.

В этих условиях одним из самых передовых методов защиты системы электроснабжения может быть система, основанная на современных цифровых аппаратных средствах в синтезе с программным обеспечением, передачей данных и расширенной информационно-коммуникационной сетью.

Для систем электроснабжения в работе [1] был предложен принцип централизованной дифференциальной защиты *Wide Area Differential Protection (WADP)*. Этот принцип позволяет реализовать основную защиту, резервную защиту, механизм подтверждения отключения и механизм последовательных отключений для сети. Авторами была создана модель распределительной электрической сети – гексагональной сети и рассмотрен данный подход к построению релейной защиты на ее примере. Гексагональная распределительная сеть (ГРС) – это гибкая интеллектуальная электрическая сеть, представленная в виде совокупности территориально распределенных узлов нагрузки (УН), соединенных между собой проводниками унифицированного сечения и имеющая топологию в виде шестиугольников, стремящихся к правильной форме. ГРС является инвариантной: возможна переконфигурация узла и смена направления мощности в ветвях сети.

## Принцип централизованной дифференциальной защиты Wide Area Differential Protection (WADP)

В системе WADP основная защита работает на основе традиционных дифференциальных реле, которые установлены на каждом компоненте системы электроснабжения. Такие дифференциальные реле не имеют резервирования.

Принцип дифференциальных колец позволяет реализовать резервную дифференциальную защиту на основе расширенного дифференциального принципа.

Когда происходит авария (короткое замыкание) в линии или ошиновке, основная цель защиты заключается в определении и изолировании поврежденной секции с использованием методов, основанных на дифференциальном принципе. В системе WADP используется дифференциальный принцип, но в более расширенной форме под названием «Дифференциальное кольцо». Дифференциальное кольцо формируется его граничными трансформаторами тока.

Дифференциальное кольцо определяет область, в рамках которой может быть применен дифференциальный принцип. С помощью данного принципа зона дифференциального сравнения была расширена от единичного элемента системы электроснабжения до широкой области. Дифференциальные кольца различной величины отображены на рис. 1.

$$\bar{I}_{\text{ТТ}1} + \bar{I}_{\text{ТТ}2} + \bar{I}_{\text{ТТ}8} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{I}_{\text{ТТ}2} + \bar{I}_{\text{ТТ}3} = 0 \quad (2)$$

$$\bar{I}_{\text{ТТ}3} + \bar{I}_{\text{ТТ}4} = 0 \quad (3)$$

Уравнения (1) – (3) описывают традиционный дифференциальный принцип.

Из уравнения (2):

$$\bar{I}_{\text{ТТ}2} = -\bar{I}_{\text{ТТ}3} \quad (4)$$

Подставив уравнение (4) в (1), получим:

$$\bar{I}_{\text{ТТ}1} + (-\bar{I}_{\text{ТТ}3}) + \bar{I}_{\text{ТТ}8} = 0 \quad (5)$$

Из уравнения (3):

$$\bar{I}_{\text{ТТ}4} = -\bar{I}_{\text{ТТ}3} \quad (6)$$

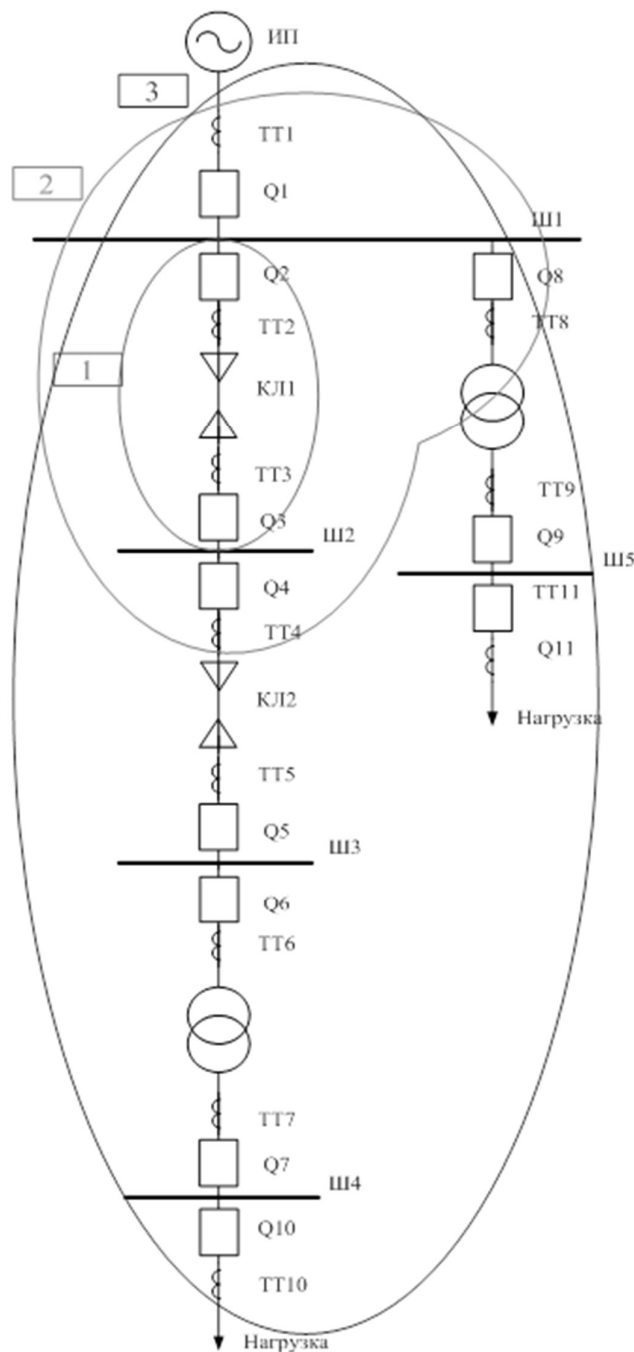
Подставив уравнение (6) в (5), получим:

$$\bar{I}_{\text{ТТ}1} + \bar{I}_{\text{ТТ}4} + \bar{I}_{\text{ТТ}8} = 0 \quad (7)$$

Уравнение (7) отражает баланс дифференциального кольца. Такое дифференциальное кольцо включает в себя множество единичных элементов системы.

Кольцо сбалансировано, когда сумма токов измерительных преобразователей (трансформаторов тока) вокруг рассматриваемого кольца равна нулю. При этом подразумевается, что все компоненты, находящиеся внутри дифференциального кольца, неповрежденные. С другой стороны, кольцо является «активным» (несбалансированным), когда сумма токов отлична от нуля.

Это может быть вызвано неисправностью внутреннего компонента (коротким замыканием) или же ошибкой измерительного преобразователя, формирующего дифференциальное кольцо.



**Рис. 1. Дифференциальные кольца принципа WADP**

Работа дифференциальных колец базируется на пяти основных принципах:

1. В нормальных условиях все дифференциальные кольца неактивны (сбалансированы).

2. Наличие короткого замыкания нарушает сбалансированное состояние определенных дифференциальных колец.

3. Третье дифференциальное кольцо всегда активно, вне зависимости от положения места короткого замыкания.

4. Если кольцо активно, внешние окружающие его дифференциальные кольца также активны.

5. Если кольцо неактивно, все внутренние относительно него кольца также неактивны.

Дифференциальные кольца различаются по своим размерам, расположению и функциям. Для примера, кольцо 1 (см. рис. 1) содержит только один единственный компонент, а кольцо 2 - три компонента (две шины и линия). Для обнаружения неисправности и нахождения места повреждения в системе WADP выделено три типа колец.

#### 1. Внутреннее дифференциальное кольцо

Внутреннее дифференциальное кольцо – это кольцо, сформированное трансформаторами тока вокруг единичного элемента сети (например, кабельной линии). Оно охватывает такую же область сети, как и традиционные дифференциальные реле и выполняет аналогичные функции – основная защита элемента. На рис. 1 кольцо 1 – внутреннее.

#### 2. Расширенное (промежуточное) дифференциальное кольцо

Промежуточное дифференциальное кольцо образуется путем расширения внутреннего кольца за счет соседних трансформаторов тока с обоих концов. На рис. 1 кольцо 2 является расширенным для кольца 1. Это кольцо является резервирующим для внутреннего кольца 1. При возникновении короткого замыкания в кабельной линии КЛ1 и отказе основной защиты, релейная защита, входящая в расширенное кольцо, срабатывает и отключает выключатели Q1, Q4, Q8

#### 3. Внешнее дифференциальное кольцо

Внешнее дифференциальное кольцо (кольцо 3) сформировано трансформаторами тока, расположенными на границе защищаемой области. Оно полностью покрывает защищаемую зону.

### Алгоритмы обнаружения и ликвидации места повреждения

Наличие короткого замыкания в сети изменяет статус дифференциальных колец. Некоторые из них становятся активными, другие остаются сбалансированными. Именно это свойство системы WADP используется для обнаружения неисправности и ее места положения [2].

При возникновении короткого замыкания в кабельной линии КЛ1 (в зоне первичной защиты кольца 1) кольцо 1 становится активным. Дифференциальная защита отправляет сигнал на отключение выключателей Q2, Q3 и пуск релейной защиты промежуточного кольца 2.

На основную защиту, представленную традиционными дифференциальными реле, накладывается подтверждающий механизм: если первичные реле зафиксировали короткое замыкание, их отключающий сигнал блокируется до тех пор, пока не придет подтверждение от промежуточного дифференциального

кольца [3]. Данный механизм необходим для снижения вероятности ложных срабатываний защиты из-за проблем с измерительными преобразователями и цепями релейной защиты. Таким образом все первичные реле в системе контролируются расширенными дифференциальными кольцами. В случае обнаружения неисправности коммуникационных каналов, первичная защита будет функционировать автономно. Подтверждающий механизм работает по алгоритму контроля правильности срабатывания дифференциальной защиты. Согласно этому алгоритму промежуточное кольцо также должно быть активно.

Первичная защита получает подтверждение об обнаружении аварии в зоне кольца 2 от промежуточного кольца.

Промежуточное дифференциальное кольцо может оказаться сбалансированным и наличие короткого замыкания не получит подтверждения. Тогда, чтобы исключить ложное блокирование первичной защиты расширенным дифференциальным кольцом, производится дополнительная проверка. Показания трансформаторов тока внутреннего дифференциального кольца сравниваются с предельно допустимыми значениями токов. При превышении установленного предела основная защита получит разрешающий сигнал на срабатывание. Иначе, при отсутствии перегрузки по току, система сигнализирует о неисправности цепей основной релейной защиты, а сигнал на отключение выключателей заблокируется.

Если после выдержки времени отключение выключателей не произошло  $Q2, Q3$ , то срабатывают выключатели, резервирующие зону локализации короткого замыкания ( $Q1, Q4, Q8$ ).

Внутреннее кольцо используется в алгоритме определения места повреждения, так как его активация будет непосредственно указывать на минимально необходимую по площади зону изоляции. Согласно правилам 1-5, промежуточное и внешнее кольца используются для контроля ложной активации первичных реле, т.е. внутреннего кольца. Процесс проверки определяет, является ли сигнал на отключение результатом короткого замыкания или же ошибкой первичной защиты.

Ошибка измерительного преобразователя может привести к тому, что система примет за поврежденные сразу несколько элементов сети. Механизм последовательных отключений вводится в систему резервной защиты для минимизации зоны отключения в данной ситуации.

Дифференциальное кольцо формируется его граничными трансформаторами. На рис.1 для внутреннего кольца 1 граничные трансформаторы – ТТ2 и ТТ3.

Предположим, что датчик тока внутреннего кольца ТТ4 на рис. 2 неисправен. В это время происходит короткое замыкание на кабельной линии КЛ2. Внешнее кольцо становится активным. В итоге шина Ш2 и кабельная линия КЛ2 будут определены системой как поврежденные. Внутреннее и расширенное кольца шины Ш2 оба активны. Внутреннее кольцо использует для дифференциального сравнения трансформаторы тока ТТ3 и ТТ4, один из которых

неисправен, что приводит к нарушению баланса данного кольца. Расширенное кольцо шины Ш2 становится активным, так как в его область (ТТ2 и ТТ5) входит поврежденная кабельная линия КЛ2. По аналогичным причинам кабельной линии КЛ2 также присваивается статус области локализации неисправности.

Исходя из изложенного, защита должна отключить выключатели Q3, Q4 и Q5, но это не будет являться минимальной зоной локализации, так как шина Ш2 работает исправно. Чтобы избежать излишнего отключения, срабатывает механизм последовательных отключений. Так как трансформатор тока ТТ4 является спорным и расположен не на границе, выключатель Q4 будет отключен первым. Данное действие фактически локализует короткое замыкание, а зона отключения при этом минимальна.

После этого события обновляется информация о топологии сети и формируется новое расширенное дифференциальное кольцо. Новое кольцо использует трансформаторы тока ТТ1, ТТ3 и ТТ11.

Как только короткое замыкание было локализовано, внешнее дифференциальное кольцо снова стало неактивным до момента появления нового повреждения.

Организация основной и резервной защиты для гексагональной распределительной сети на основе дифференциального принципа требует разработки универсального алгоритма функционирования релейной защиты. Наличие и взаимосвязь единого информационного пространства, которое позволяет получить любую информацию о состоянии сети в разных ее точках, и вычислительных блоков, осуществляющих реализацию алгоритмов работы подсистем сети, дает возможность формирования адаптивной релейной защиты в виртуальном формате, т.е. с минимальным применением физических устройств, организующих защиту электроэнергетической сети.

### **Применение системы идентификации токов в дифференциальном принципе защиты гексагональной сети**

В общем виде дифференциальный принцип действия релейной защиты заключается в сравнении токов в начале и конце линии [4]. На рис.3 ток в начале линии  $-\bar{I}_I$ , ток в конце линии  $-\bar{I}_{II}$ . Во вторичной обмотке трансформаторов тока ТА1 и ТА2 протекают токи соответственно  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$ . Складываясь в реле КА, токи  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$  одинаковые по модулю и противоположные по направлению формируют ток в реле КА равный нулю:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0. \quad (8)$$

При возникновении короткого замыкания в трансформаторе Т сумма токов в реле КА не равна нулю и реле отправляет сигнал на отключение участка.

Таким образом, ток срабатывания защиты Ис.з. должен быть больше нуля:

$$I_{с.з.} > 0. \quad (9)$$

Практически в режиме нагрузки и при внешнем коротком замыкании, ток в реле КА не может быть равен нулю, поскольку трансформаторы тока ТА1 и ТА2 имеют разные значения погрешностей, и даже при равных первичных токах

вторичные токи  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$  не равны между собой. В реле КА в режимах нагрузки и внешнего короткого замыкания есть ток небаланса  $I_{нб}$ . Ток небаланса вызван неидентичными характеристиками трансформаторов тока, током намагничивания трансформатора, разным соединением первичной и вторичной обмоток трансформаторов тока. Тогда условие несрабатывания защиты [4]:

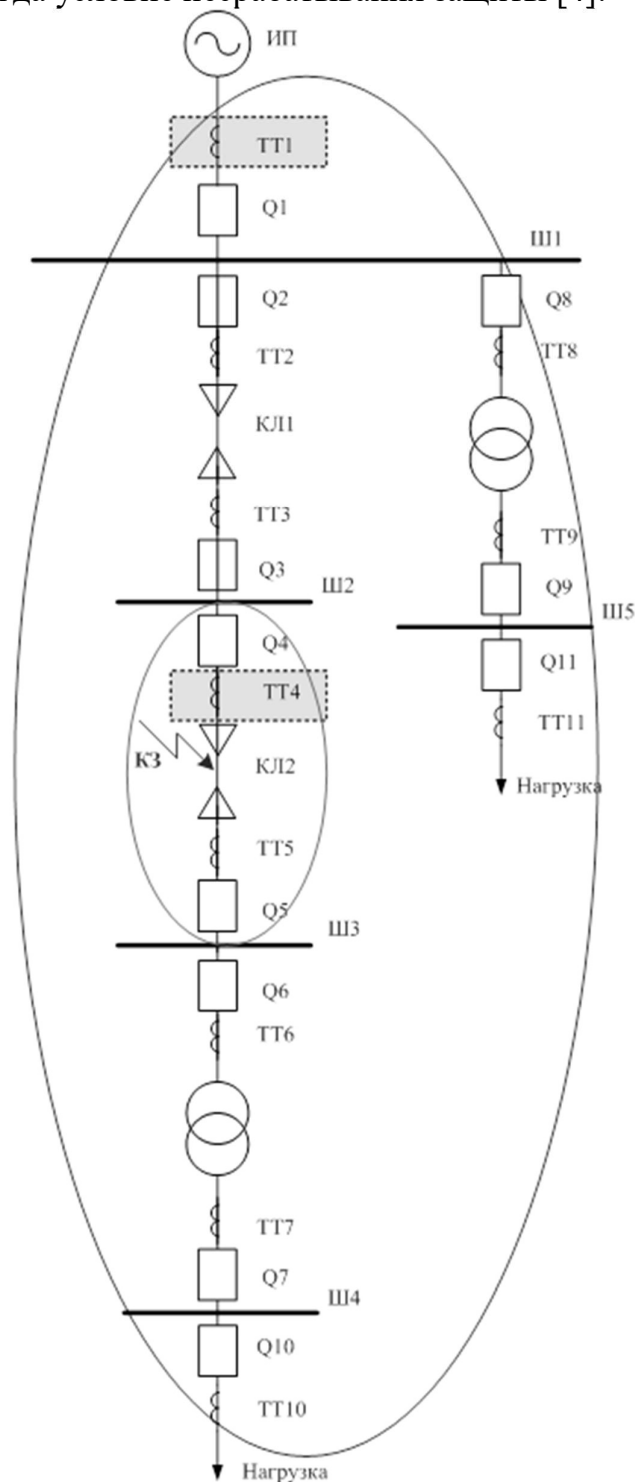


Рис. 2. Механизм последовательных отключений



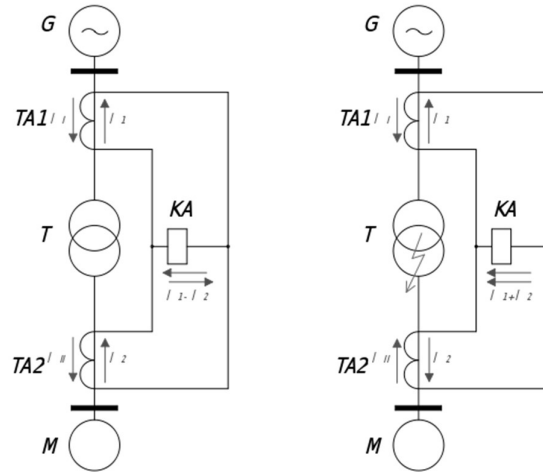


Рис. 3. Дифференциальный принцип релейной защиты

$$I_{с.з.} \geq k_n \cdot I_{нб}, \quad (10)$$

где  $k_n$ -коэффициент надежности ( $k_n=1,3$ ) [5].

Дифференциальный принцип *WADP* аналогичен рассмотренному принципу действия релейной защиты. Принцип *WADP* ранее был ориентирован на радиальную сеть, поэтому необходимо перенести его на замкнутую сеть сотовой конфигурации.

Рассмотрим формирование дифференциальных колец на примере участка гексагональной сети (рис. 4).

В нормальных условиях:

$$\bar{I}_{ТТ1} + \bar{I}_{ТТ2} + \bar{I}_{ТТ3} + \bar{I}_{Н1} = 0, \quad (11)$$

$$\bar{I}_{ТТ4} + \bar{I}_{ТТ5} + \bar{I}_{ТТ6} + \bar{I}_{Н2} = 0, \quad (12)$$

$$\bar{I}_{ТТ1} + \bar{I}_{ТТ4} = 0, \quad (13)$$

$$\bar{I}_{ТТ2} + \bar{I}_{ТТ15} = 0, \quad (14)$$

$$\bar{I}_{ТТ5} + \bar{I}_{ТТ10} = 0, \quad (15)$$

$$\bar{I}_{ТТ6} + \bar{I}_{ТТ7} = 0, \quad (16)$$

$$\bar{I}_{ТТ3} + \bar{I}_{ТТ16} = 0. \quad (17)$$

Сложив уравнения (11) и (12), затем, подставив уравнение (13), получим:

$$\bar{I}_{ТТ2} + \bar{I}_{ТТ3} + \bar{I}_{ТТ5} + \bar{I}_{ТТ6} + \bar{I}_{Н1} + \bar{I}_{Н2} = 0. \quad (18)$$

Подставив уравнения (14) – (17) в уравнение (18), получим:

$$-\bar{I}_{ТТ15} - \bar{I}_{ТТ16} - \bar{I}_{ТТ10} - \bar{I}_{ТТ7} + \bar{I}_{Н1} + \bar{I}_{Н2} = 0. \quad (19)$$

Из уравнения (19):

$$\bar{I}_{ТТ15} + \bar{I}_{ТТ16} + \bar{I}_{ТТ7} + \bar{I}_{ТТ10} = \bar{I}_{Н1} + \bar{I}_{Н2}. \quad (20)$$

Уравнение (13) отражает баланс внутреннего кольца. Баланс промежуточного (резервного) кольца сформирован уравнением (18).

Таким образом, уравнение (20) отражает баланс внешнего дифференциального кольца.

Данное внешнее кольцо включает в себя только часть защищаемого участка гексагональной сети, в отличие от третьего дифференциального кольца радиальной сети (рис. 1), которое охватывает всю защищаемую область целиком. Соответственно, для сети с гексагональной конфигурацией необходимо формирование нескольких внешних дифференциальных колец, которые в совокупности будут покрывать всю защищаемую область.

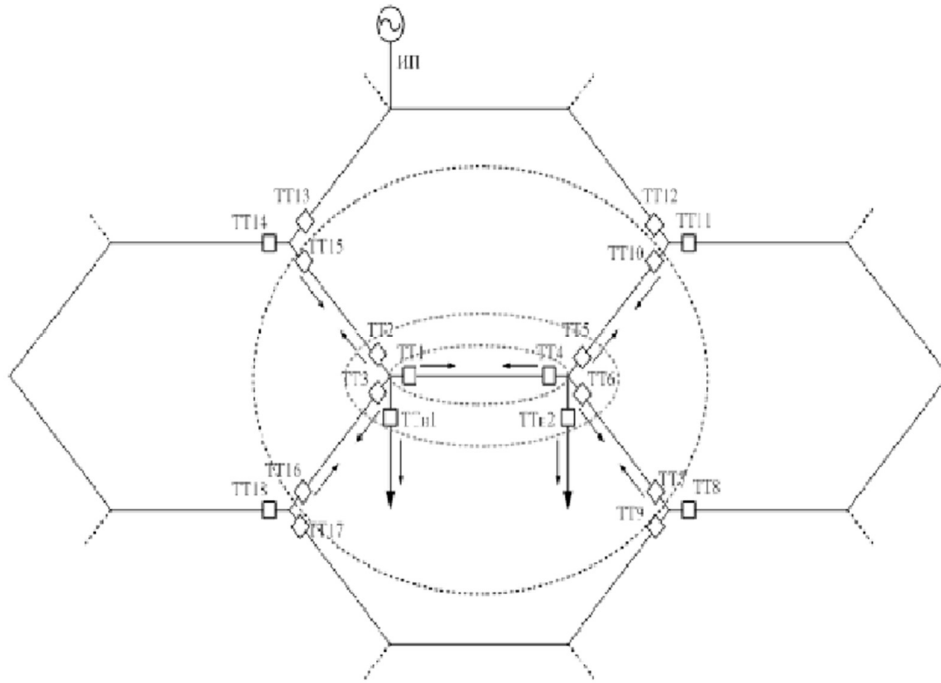


Рис. 4. Дифференциальные кольца гексагональной распределительной сети

Так как размерность гексагональной сети для конкретных случаев различна и конечна, для реализации унифицированных алгоритмов адаптивной релейной защиты требуются однозначные данные.

Каждое значение тока, необходимое для уравнения дифференциального кольца, хранится в матрице идентификации токов. Данные значения имеют свои индексы, определяющие их положение в сети. Матрица позволяет определить направление и значение тока в любой точке сети. Размерность данной матрицы определяется количеством узлов гексагональной распределительной сети.

Для реализации алгоритма функционирования релейной защиты необходима информация о топологии сети. Даная информация хранится в матричном виде и обновляется в режиме online. Топология сети задается матрицей инцидентности и отражает наличие связей между элементами сети.

Согласно системе идентификации токов условие несрабатывания релейной защиты в общем виде примет вид:

$$I_{с.з.ij} \geq |\bar{I}_{ij} + \bar{I}_{ji}|, \quad (21)$$

где  $I_{с.з.ij} = I_{нб}$  - ток срабатывания защиты линии, принадлежащей узлам  $i, j$ ,  $\bar{I}_{ij}$  - ток, протекающий от  $i$ -го узла к  $j$ -му,  $\bar{I}_{ji}$  - ток, протекающий от  $j$ -го узла к  $i$ -му.

Формула для проверки правильности срабатывания первичной релейной защиты в общем виде примет вид для заданных узлов  $a$  и  $b$ , соединяющих аварийную линию:

$$\left| \sum_{j=1}^m \bar{I}_{aj} + \sum_{j=1}^m \bar{I}_{bj} \right| \geq I_{нб}, \quad (22)$$

где  $\bar{I}_{aj}$  - ток, протекающий от  $a$  -го узла к  $j$  -му,  $\bar{I}_{bj}$  - ток, протекающий от  $b$  -го узла к  $j$  -му.

В общем виде условие сбалансированности внешнего кольца гексагональной распределительной сети для заданных узлов  $a$  и  $b$ , соединяющих аварийную линию, выглядит так:

$$\left| \sum_{i=1}^n \bar{I}_{ia} + \sum_{i=1}^n \bar{I}_{ib} - 2(\bar{I}_{aa} + \bar{I}_{bb}) \right| \geq I_{нб}, \quad (23)$$

где  $\bar{I}_{ia}$  - ток, протекающий от  $i$  -го узла к  $a$  -му,  $\bar{I}_{ib}$  - ток, протекающий от  $i$  -го узла к  $b$  -му,  $\bar{I}_{aa}$  - ток нагрузки узла  $a$ ,  $\bar{I}_{bb}$  - ток нагрузки узла  $b$ .

Баланс внешнего кольца необходим для подтверждения правильности срабатывания основной защиты при возникновении спорной ситуации между условием баланса промежуточного и внутреннего кольца.

### Разработка алгоритма функционирования релейной защиты гексагональной распределительной сети

Система адаптивной релейной защиты, как и система управления и мониторинга всей сети, основывается на многоагентном принципе [6,7].

К каждому универсальному узлу нагрузки прикреплен агент релейной защиты. Он получает информацию от смежных узлов при помощи ИКС, от субагентов, производящих необходимые для реализации алгоритма защиты вычисления и сравнения и формирует сигнал на срабатывание релейной защиты, если в этом есть необходимость.

Если нет спорных ситуаций, то агенты релейной защиты работают на исполнительном уровне. Т.к. пакет информации для агента релейной защиты ограничен смежными узлами (рис.5), при реализации алгоритма контроля правильности срабатывания основной защиты может возникнуть необходимость обращения к определению баланса внешнего кольца.

Для агента узла 1 доступна информация от узлов 2, 3 и 4. Однако для формирования внешнего кольца необходима информация от узлов 5 и 6.

Для осуществления этого действия агент релейной защиты запрашивает информацию на организационном уровне. На этом уровне субагент формирования внешних колец обрабатывает информацию и через агента распределенной системы управления и мониторинга (РСМУ) передает подтверждение или отклонение запроса. Тогда, согласно рис.5, внешнее будет сформировано.

Алгоритм работы адаптивной релейной защиты гексагональной сети состоит из основного и нескольких вспомогательных алгоритмов:

- основной алгоритм,
- алгоритм контроля правильности срабатывания основной защиты,
- алгоритм обращения к внешнему кольцу.

Основной алгоритм включает в себя действие первичной дифференциальной защиты и резервной защиты промежуточного кольца.

Вспомогательный алгоритм контроля правильности срабатывания основной защиты необходим для исключения ложного срабатывания основной защиты. Вспомогательный алгоритм обращения к внешнему кольцу не является обязательным алгоритмом. Однако он помогает исключить ошибки и выявить неисправности в элементах и связях сети. Эти алгоритмы функционируют на обоих уровнях системы управления и мониторинга гексагональной сети, что говорит о взаимосвязанности этой системы с системой адаптивной релейной защиты.

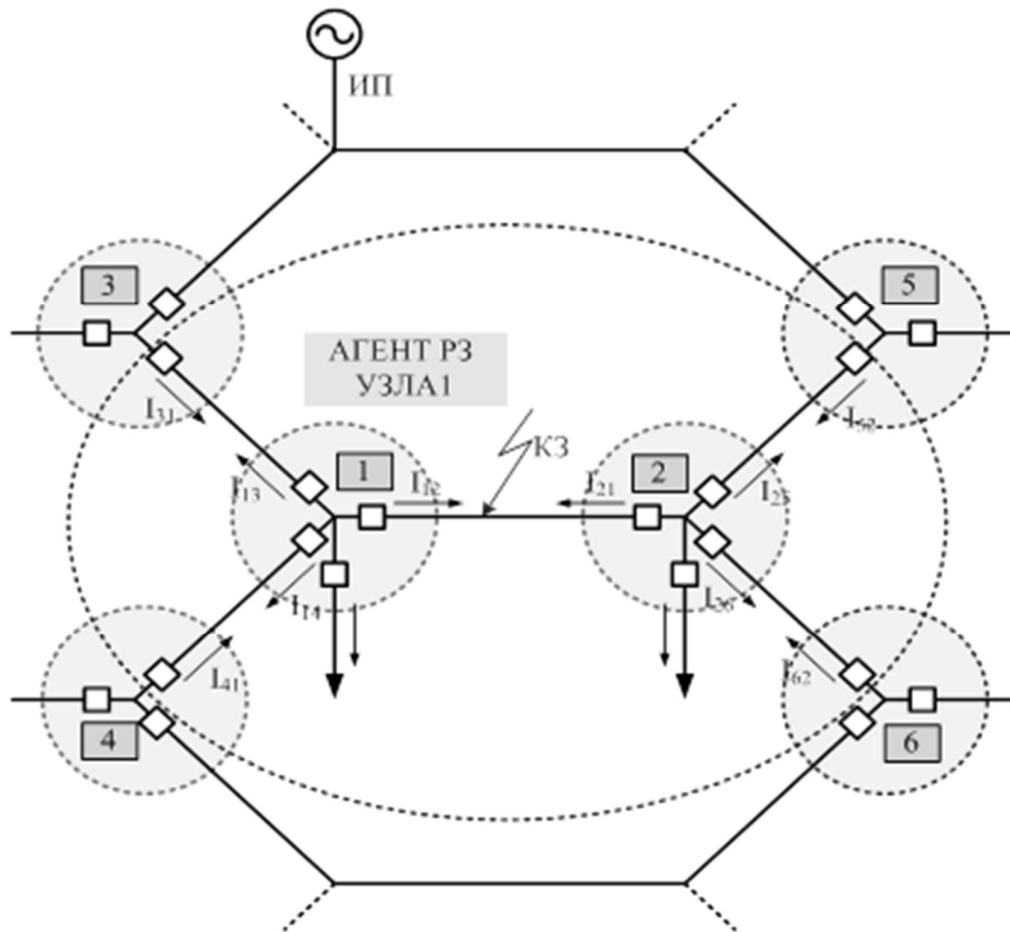


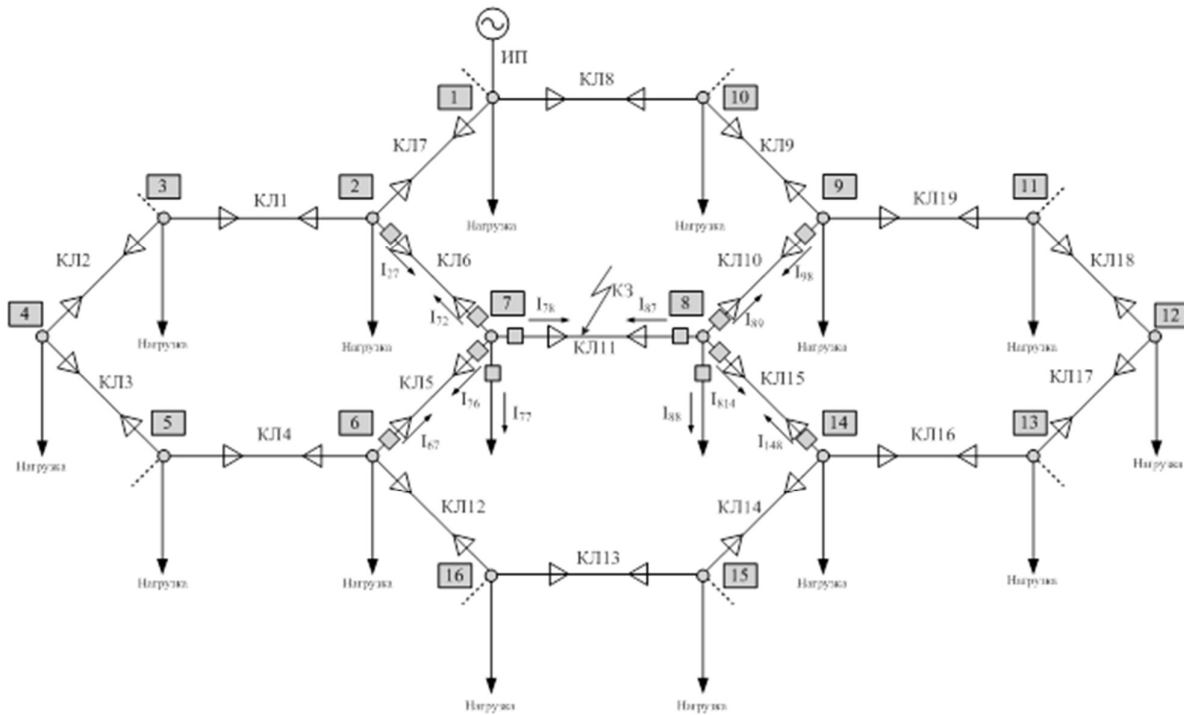
Рис. 5. Доступный пакет информации от смежных узлов и узлов внешнего кольца

### Моделирование адаптивной релейной защиты в гексагональной распределительной сети

Разработанная модель гексагональной сети в программном продукте PSCAD для внедрения алгоритма функционирования адаптивной релейной защиты схематично представлена на рис.6.

Рассмотрим реализацию алгоритма адаптивной релейной защиты в случае отсутствия неисправностей в цепях релейной защиты, т.е. срабатывание основной защиты и отключение участка возникновения короткого замыкания происходит согласно алгоритму без подключения внешнего кольца и проверки по предельно допустимым токам.

Результаты моделирования представлены на рис.7. На данном рисунке приведены осциллограммы токов в линиях (КЛ5, КЛ6, КЛ10, КЛ15), имеющих связь через узлы с аварийной линией, и самой линии КЛ11, где произошло короткое замыкание. Кабельные линии КЛ5, КЛ6, КЛ10, КЛ15 и прилежащие к ним выключатели принимают участие в реализации алгоритма основной релейной защиты. Токи в кабельных линиях КЛ5, КЛ6, КЛ10, КЛ11, КЛ15 –  $I_{кл5}$ ,  $I_{кл6}$ ,  $I_{кл10}$ ,  $I_{кл11}$ ,  $I_{кл15}$  соответственно.



**Рис. 6. Схематичное изображение модели гексагональной распределительной сети для реализации алгоритма адаптивной релейной защиты**

Линия КЛ11 соединяет узлы 7 и 8. Соответственно складывая дифференциальные токи, текущие от узла 7 к узлу 8 и от узла 8 к узлу 7, вычислительный блок

получает сумму токов, обозначенных на рис.4.19  $I_{sum1}$ . Эта сумма токов описывает баланс внутреннего кольца.

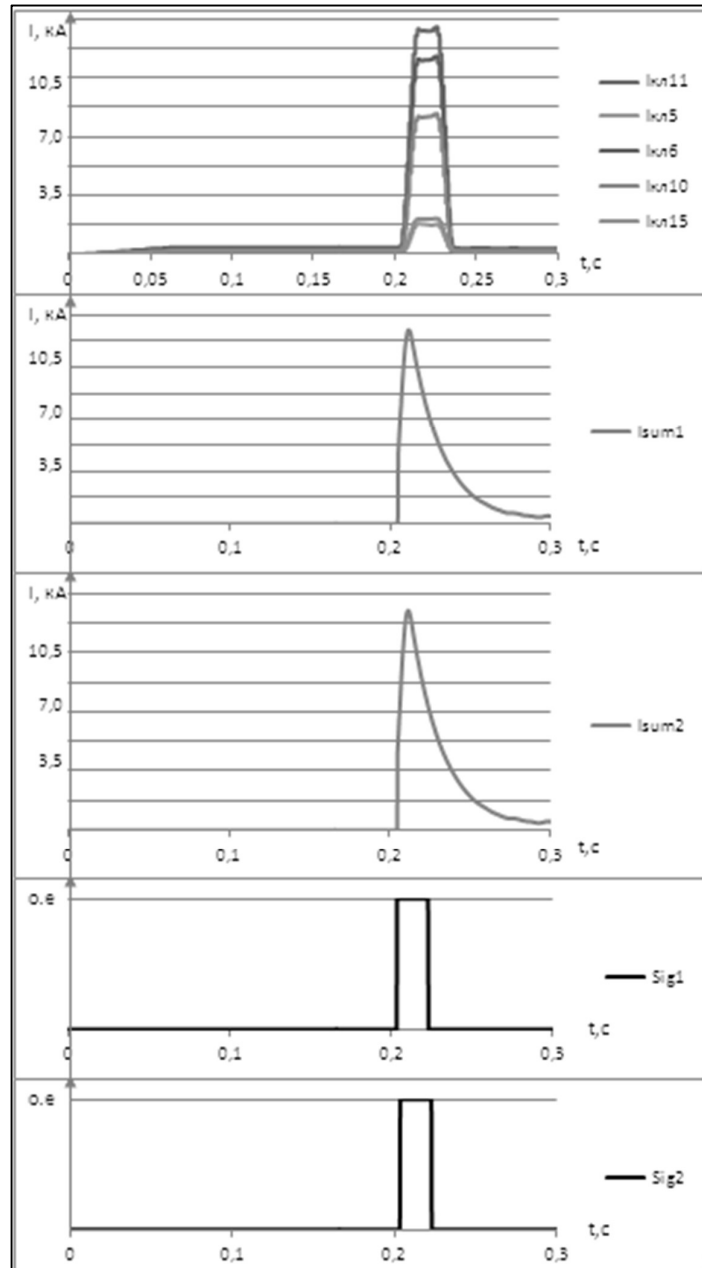
Короткое замыкание происходит в момент времени 0,2 с. Согласно осциллограмме и условию алгоритма, как только ток  $I_{sum1}$  становится больше определенного значения, передается сигнал  $Sig1$  (рис.7) на срабатывание основной защиты и пуск резервной защиты. Далее вычислительный блок проверяет условие промежуточного кольца и блокирует срабатывание первичной защиты. Значение  $I_{sum2}$  (сумма дифференциальных токов промежуточного кольца), превышая определенное значение, подтверждает выполнение условия. Происходит передача сигнала  $Sig2$  о правильности работы основной защиты и подтверждении срабатывания выключателей линии КЛ11, отмены пуска резервной защиты. Ток в линии КЛ11 в момент времени 0,241 с становится равным нулю, а в остальных линиях КЛ5, КЛ6, КЛ10, КЛ15 устанавливается значение тока нормального режима.

Возможна ситуация, когда основная защита работает правильно, реагируя на короткое замыкание в линии, но условие промежуточного кольца блокирует сигнал о подтверждении срабатывания основной защиты. Тогда включается алгоритм обращения к внешнему кольцу. Осциллограммы токов в линиях, суммарных токов алгоритма и сигналов, соответствующих данному сценарию реализации алгоритма адаптивной релейной защиты приведены на рис.8. Согласно рисунку, характер и значения токов аналогичны рассмотренному ранее случаю.

Однако проверка условия баланса промежуточного кольца не подтверждает наличия короткого замыкания внутри, о чем свидетельствует нулевое значение сигнала  $I_{sum2}$ . Запускается алгоритм обращения к внешнему кольцу, согласно которому вычисляется сумма дифференциальных токов внутри этого кольца  $I_{sum3}$  и передается сигнал на подтверждение срабатывания основной защиты  $Sig2$ , отмену пуска резервной защиты. Происходит отключение выключателей линии КЛ11 и в момент времени 0,241 ток  $I_{кл11}$  становится равным нулю.

Резервная защита в алгоритме адаптивной релейной защиты гексагональной сети срабатывает только при условии истечения времени выдержки. При аналогичных условиях, рассмотренных в первой реализации алгоритма, происходит короткое замыкание в момент времени 0,2 с в кабельной линии КЛ11 (рис.8б). Когда  $Sig1$  становится равен 1 (высокий уровень), т.е. подтверждается дисбаланс внутреннего кольца, запускается выдержка времени длительностью 0,1 с.

Осциллограммы токов в рассматриваемых линиях  $I_{кл5}$ ,  $I_{кл6}$ ,  $I_{кл10}$ ,  $I_{кл11}$ ,  $I_{кл15}$  и токов  $I_{sum1}$ ,  $I_{sum2}$  отличны от осциллограмм, рассматриваемых ранее реализаций алгоритма (рис.7, 8б). Т.к. выключатели линии КЛ11 не отключаются, то ток в линиях держится на уровне токов аварийного режима. Как только время выдержки истекает, передается сигнал на срабатывание выключателей промежуточного кольца (резервная защита). В момент времени 0,332 с ток в рассматриваемых линиях становится равным нулю.

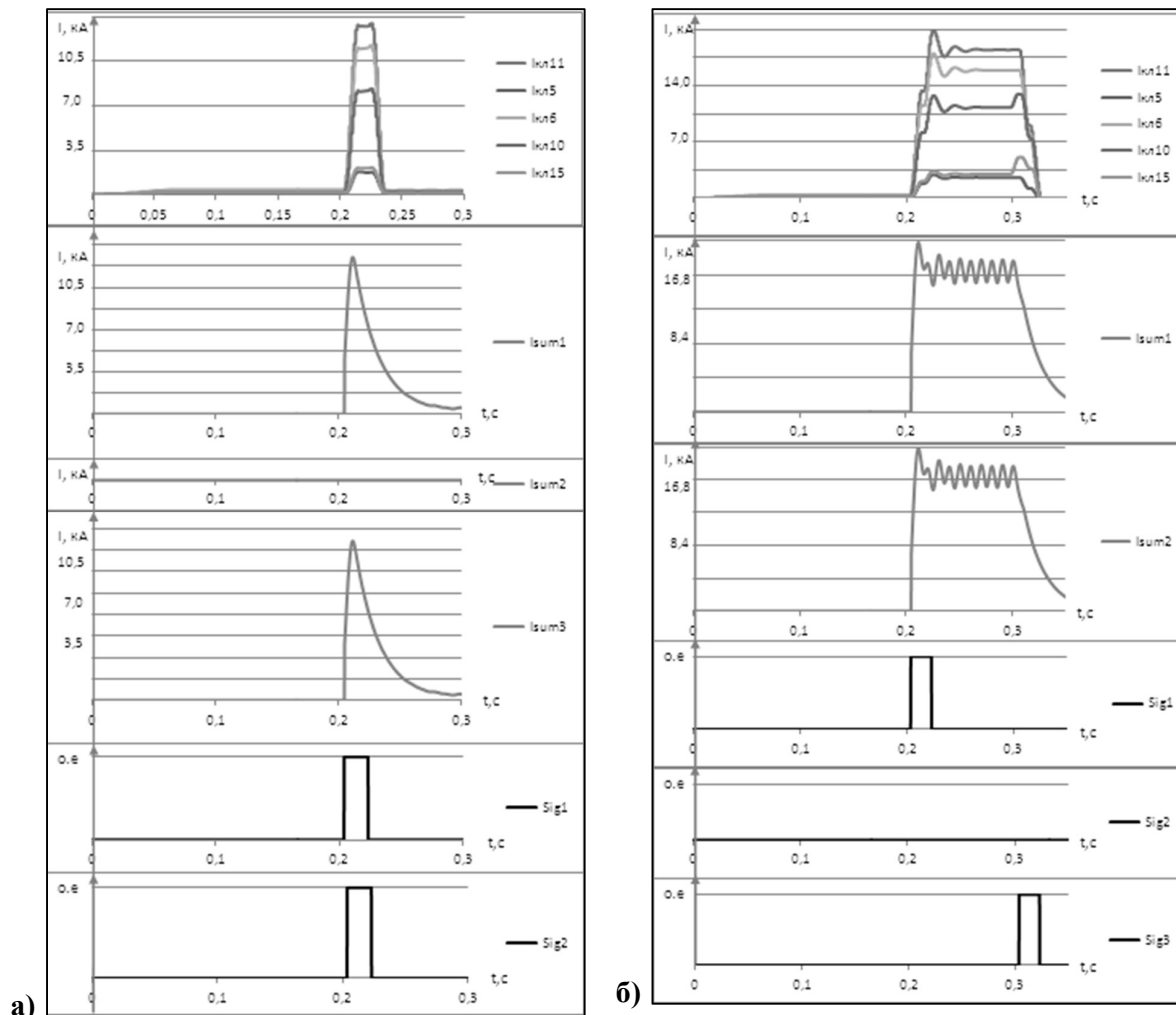


**Рис. 7. Осциллограммы токов и сигналов при реализации основного алгоритма защиты ГРС**

При помощи модели гексагональной распределительной сети в программном продукте *PSCAD* осуществлена реализация разработанного алгоритма адаптивной релейной защиты. Данный алгоритм включает функционирование основной и резервной защиты сети на основе одного и того же дифференциального принципа. Дополнение и детализация данного алгоритма в дальнейшем позволит осуществить многократное резервирование сети.

Применение дополнительных компонентов библиотеки *PSCAD*, в том числе элементов *Sequencer*, дает возможность создания более сложных сценариев

аварий и соответственного расширения алгоритма адаптивной релейной защиты гексагональной сети



**Рис. 8. Осциллограммы токов и сигналов:**

- а – при реализации основного алгоритма и неисправности промежуточного кольца защиты ГРС;  
 б – при реализации алгоритма срабатывания резервной защиты ГРС

### Библиографический список

1. **Z. Li.** Global Energy Interconnection. Academic Press; 1 edition, 2015. - 396 С.
2. **J. Tang, P.G.Mclaren,** ‘Wide Area Differential Protection System’, Ph.D Dissertation, 2006.
3. **Adamiak, M.; Redfern, M.;** ‘Communications systems for protective relaying’, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, Issue 3, July 1998 Page(s): 14 - 18, 20-2..
4. **P. Mahat, Z. Chen, V. Bak-Jensen, C. Bak** A simple adaptive over current protection of distribution system with distributed generatez// Smart Grid, IEEE Transaction on, vol.2, pp. 428-437, sept.2011
5. **Шнеерсон, Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.: ил.
6. **Копьев, В. Н.** Релейная защита: учебное пособие; Томский политехнический университет. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 160 с.



7. **H. Wan, K. Li, K. Wong** An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system//Industry Applications, IEEE. Transaction on, vol.46. pp. 2188-2124, sept-oct.2010.
8. **31. J.-H. Chen, S.-H. Chen, Y.-M. Yang** Study on adaptive protection relay system based on multi-agent// in Machine learning and Cybernetic, 2005. Proceeding of 2005 International Conference on, vol. 1, pp. 114-118, ang. 2005.

**A.B. Loskutov, A.S. Pankova, O.A. Pronina**

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE  
SYSTEM OF ADAPTIVE RELAYING OF THE HEXAGONAL  
DISTRIBUTION POWER NETWORK**

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

**Abstract:** Article describes new approach to creation of distribution power networks by the hexagonal principle in which functions of management are carried out is decentralized in universal knots of loading. The universal algorithm decision-making on impact on switches depending on change of loading in network is offered.

**Key words:** hexagonal network differential protection; algorithm, PSCAD, control system.

**References**

- [1] Z. Li. Global Energy Interconnection. Academic Press; 1 edition, 2015. - 396 C.
- [2] J. Tang, P.G.Mclaren, 'Wide Area Differential Protection System', Ph.D Dissertation, 2006.
- [3] Adamiak, M.; Redfern, M.; 'Communications systems for protective relaying', IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, Issue 3, July 1998 Page(s): 14 - 18, 20-2..
- [4] P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, C. Bak A simple adaptive over current protection of distribution system with distributed generatez// Smart Grid, IEEE Transaction on, vol.2, pp. 428-437, sept.2011
- [5] Schneerson E.M. Digital relay protection. – M.: Energoatomizdat, 2007. 549 pages: s ilt.
- [6] Kopyev V. N. Relay protection: manual; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2011. – 160 pages.
- [7] H. Wan, K. Li, K. Wong An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system//Industry Applications, IEEE. Transaction on, vol.46. pp. 2188-2124, sept-oct.2010.
- [8] 31. J.-H. Chen, S.-H. Chen, Y.-M. Yang Study on adaptive protection relay system based on multi-agent// in Machine learning and Cybernetic, 2005. Proceeding of 2005 International Conference on, vol. 1, pp. 114-118, ang. 2005.

**И. А. Любченко**

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Иркутский государственный университет путей сообщения

**Аннотация:** В статье рассматриваются возможности улучшения качества электроэнергии, поступающей на устройства сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ), посредством применения активных кондиционеров гармоник. Представлена расчетная модель схемы электроснабжения подстанций СЦБ. Определены суммарные коэффициенты гармоник при наличии и отсутствии активных кондиционеров гармоник.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, устройства автоблокировки, активные коэффициенты гармоник.

Наличие в электрических сетях оборудования с нелинейными вольтамперными характеристиками приводит к возникновению высших гармонических составляющих. Вследствие этого искажаются кривые напряжений и токов и появляются избыточные потери в элементах систем электроснабжения [1-4].

В системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей, питающих устройства сигнализации, централизации и автоблокировки, могут наблюдаться значительные гармонические искажения, далеко выходящие за допустимые пределы. Это может приводить к сбоям в работе ответственных потребителей СЦБ. Наиболее распространенными сбоями являются ошибочные срабатывания автоблокировки, ставящие под угрозу непрерывность и безопасность перевозочного процесса, а также приводящие к значительным экономическим убыткам. К таким сбоям относятся сигналы о ложной занятости или свободности блок-участков. Поэтому вопросы улучшения качества электроэнергии в СЭС объектов СЦБ по критерию гармонических искажений имеют несомненную актуальность.

Основное питание аппаратуры автоблокировки осуществляется от высоковольтных линий СЦБ (ВЛ СЦБ) 10 кВ, сооружаемых вдоль железнодорожных путей. Для резервного электроснабжения используется высоковольтная линия продольного энергоснабжения (ВЛ ПЭ) 10-35 кВ [5,6]. Вариантом линии ПЭ может быть линия «два провода–рельс» (ДПР), от которой получают питание трехфазные линейно-путевые и районные потребители.

Одним из методов снижения гармонических искажений в системах электроснабжения железных дорог переменного тока является применение активных кондиционеров гармоник (АКГ), принцип действия которых основан на анализе тока нелинейной нагрузки и генерировании в сеть таких же гармоник тока, но с противоположной фазой.

Для анализа влияния АКГ на качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих устройства автоблокировки, проведено моделирование

системы электроснабжения объектов СЦБ с помощью ПК Fazonord [7], фрагмент расчетной схемы которой показан на рис. 1.

Схема включает следующие модели следующих элементов СЭС: тягового трансформатора ТДТНЖ-40000/230/27,5/11 и сетей, отвечающих разным вариантам подключения нетяговых потребителей. Правое плечо питания межподстанционной зоны представлено моделью тяговой сети двухпутного участка длиной 20 км с проводами ПБСМ-95+МФ-100 и АС-70 с полевой стороны для организации модели линии ДПР. К ней присоединен трехфазный трансформатор 27,5/0,4 мощностью 250 кВ·А. ВЛ СЦБ 10 кВ подключена к районной обмотке тягового трансформатора.

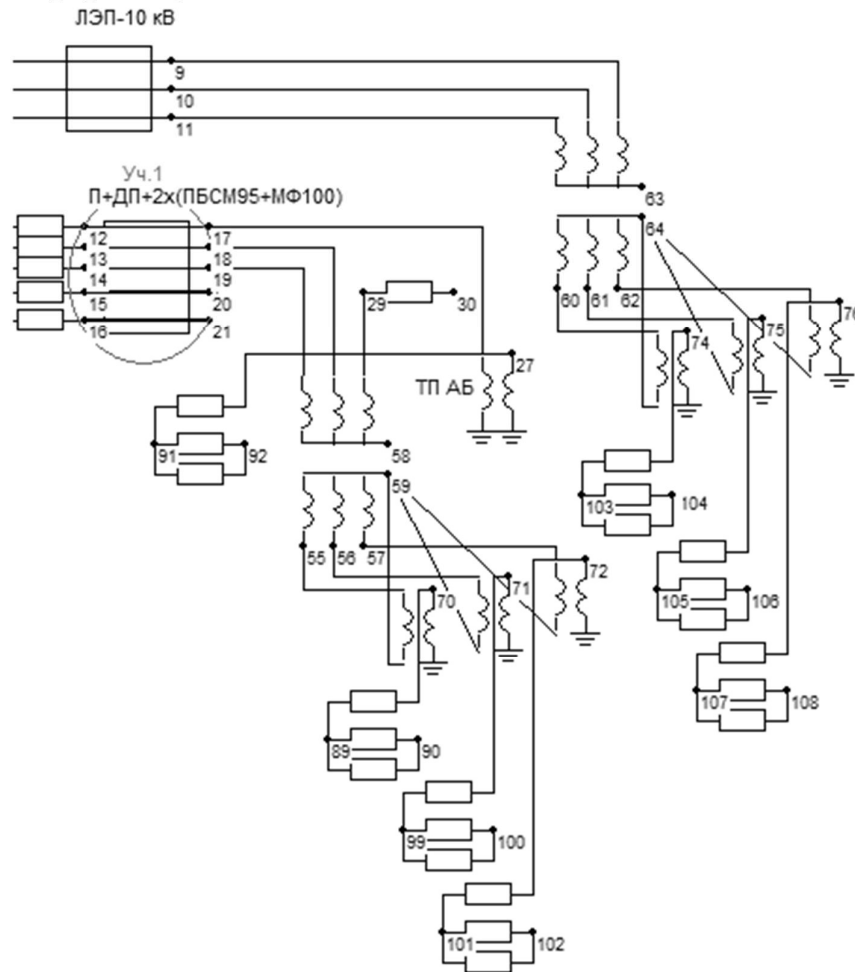


Рис. 1. Расчетная схема ПК Fazonord с АКГ на стороне 0,4 кВ подстанций СЦБ

При питании нетяговых потребителей от тягового трансформатора сказывается влияние переменной тяговой нагрузки, создающей значительные проблемы с качеством напряжения. Линия ДПР, кроме того, отличается значительной неоднородностью фаз и возвратом части тока через землю, что приводит к существенной несимметрии напряжений и повышенной их несинусоидальности.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений на стороне 0,4 кВ трансформаторных подстанций СЦБ, питающихся

от ЛЭП СЦБ и ЛЭП ДПР при наличии и отсутствии АКГ представлены в табл. 1 и на рис. 2 – 5. Формы кривых и спектральный состав напряжений проиллюстрированы на рис. 6 – 8.

Таблица 1

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжений, %

Название ЛЭП	Наличие АКГ	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
		Среднее	Максимум	Среднее	Максимум	Среднее	Максимум
ВЛ СЦБ	Нет	12,2	17,0	16,7	22,0	11,8	19,8
	Есть	0,26	0,44	0,24	0,33	0,24	0,44
ЛЭП ДПР	Нет	12,4	21,2	13,9	18,8	20,1	25,1
	Есть	0,23	0,43	0,27	0,36	0,3	0,49

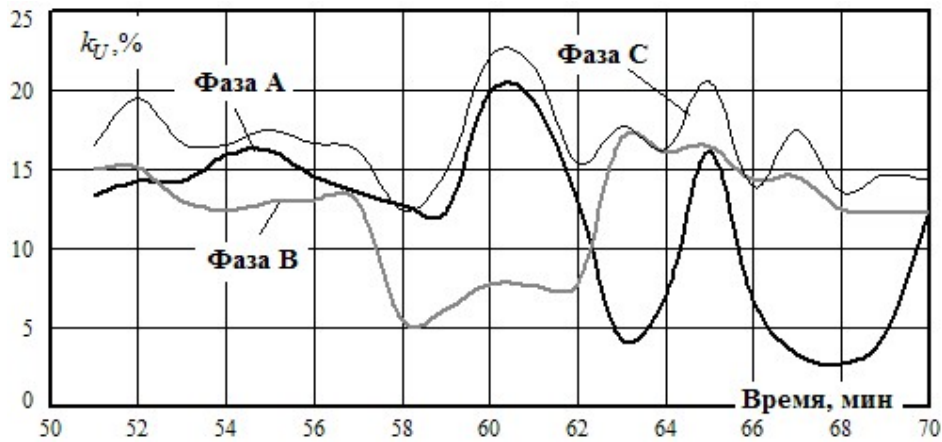


Рис. 2. Динамика изменения суммарного коэффициента гармоник на шинах 0,4 кВ трансформатора, присоединенного к ВЛ СЦБ 10 кВ при отсутствии АКГ

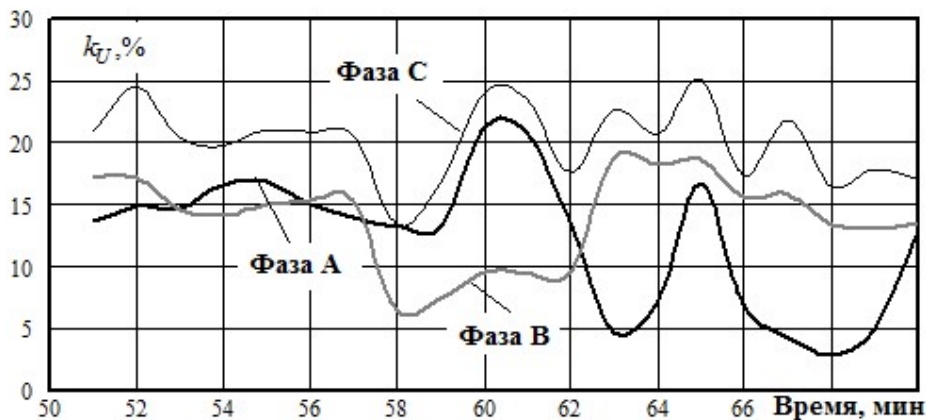


Рис. 3. Динамика изменения суммарного коэффициента гармоник на шинах 0,4 кВ трансформатора СЦБ, подключенного к ЛЭП ДПР при отсутствии АКГ

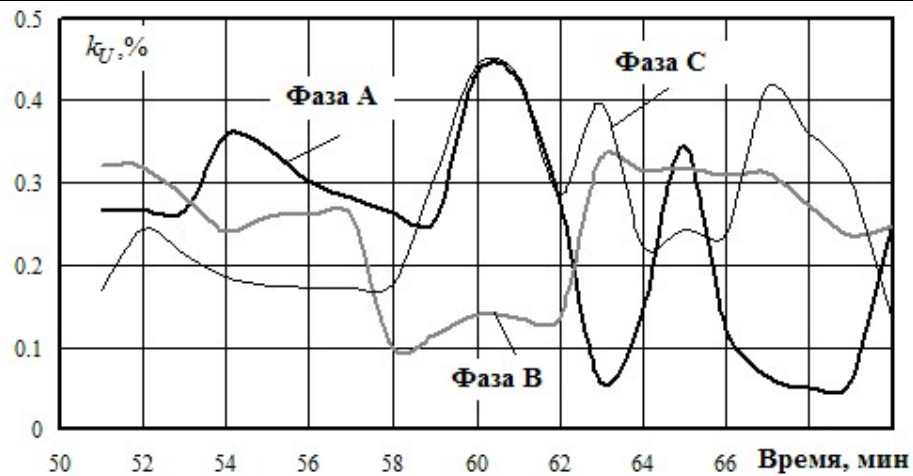


Рис. 4. Динамика суммарного коэффициента гармоник 0,4 кВ трансформатора, присоединенного к ВЛ СЦБ при наличии АКГ

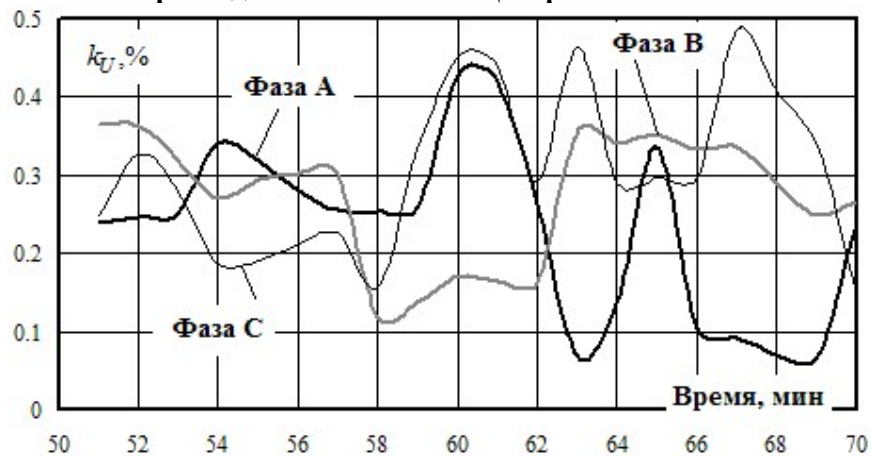


Рис. 5. Динамика суммарного коэффициента гармоник напряжений 0,4 кВ трансформатора, подключенной к ЛЭП ДПР при наличии АКГ

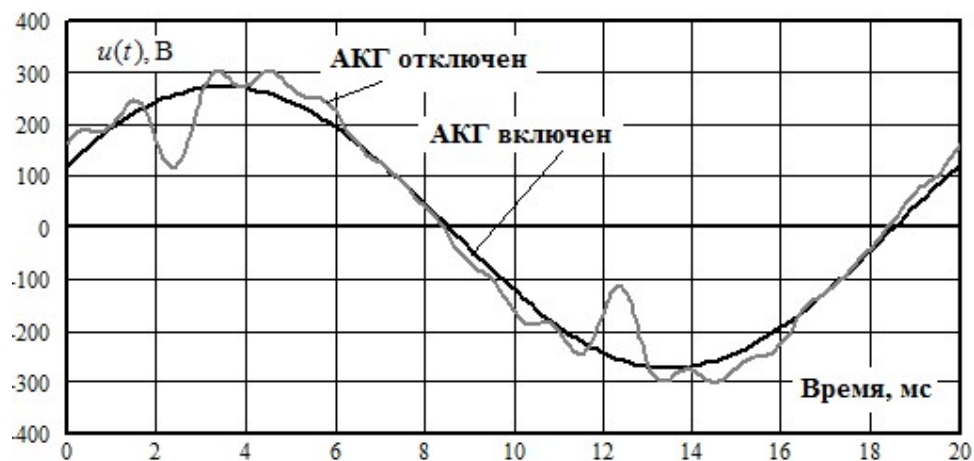


Рис. 6. Форма кривой напряжения 0,4 кВ фазы А подстанции СЦБ, подключенной к ЛЭП ДПР, для 60-й минуты моделирования

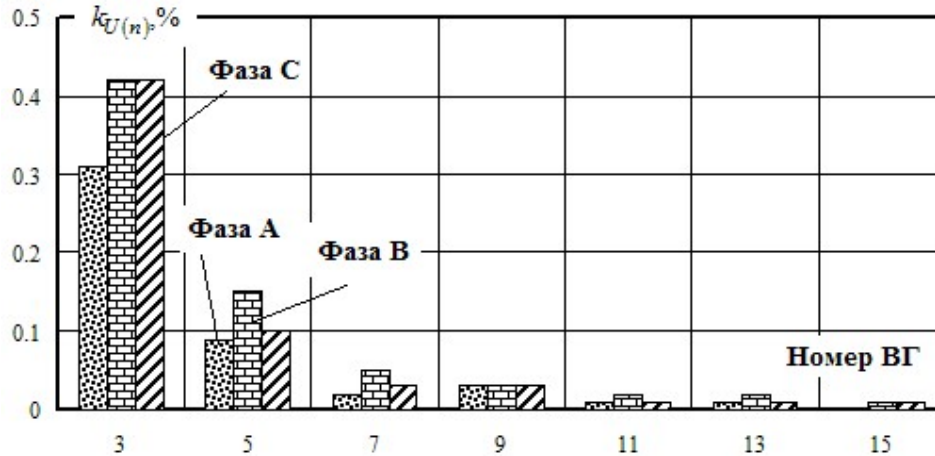


Рис. 7. Спектральный состав напряжений на шинах 0,4 кВ трансформатора, присоединенного к ВЛ СЦБ

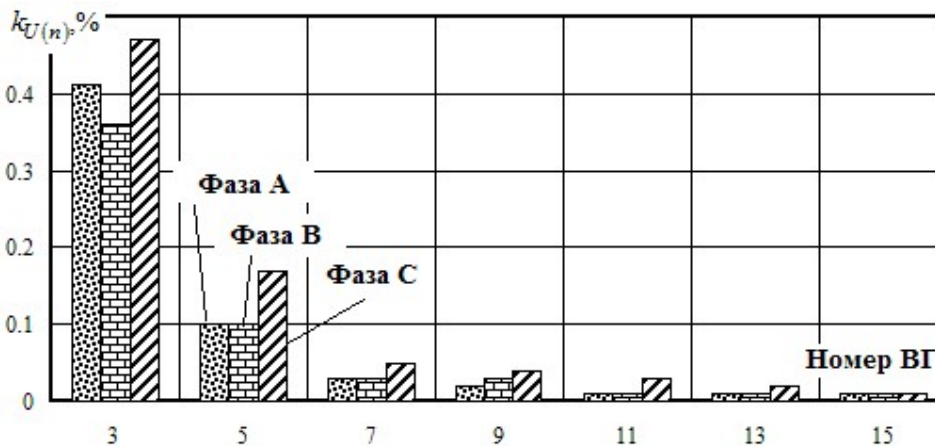


Рис. 8. Спектральный состав напряжений на шинах 0,4 кВ трансформатора, присоединенного к ЛЭП ДПР

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- наибольшей величиной суммарного коэффициента гармонических искажений характеризуется подстанция, присоединенная к ЛЭП ДПР. Это связано с магнитным влиянием тяговой сети, пропорциональным частоте;
- АКГ способны обеспечить кардинальное снижение гармонических искажений на шинах 0,4 кВ подстанций объектов СЦБ.

#### Библиографический список

1. Аррилага, Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. М. : Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
2. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер и др. // Омский научн. вестник. 2013. № 2(120). С. 178–183.

3. **Жежеленко, И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. - М. : Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. **Каргин, С. В.** Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях общего назначения / С. В. Каргин, А. Н. Краснова, Р. Р. Бекбулатов. - М. : Энергопрогресс, 2012. 108 с.
5. **Герман, Л. А.** Устройства и линии электроснабжения автоблокировки / Л. А. Герман, М. И. Векслер, И. А.Шелом. – М.: Транспорт, 1987. – 192 с.
6. **Герман, Л. А.** Электроснабжение автоблокировки и электрической централизации / Л. А. Герман, А.Л. Калинин. – М.: Транспорт, 1974. – 168 с.
7. **Закарюкин, В. П.** Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 3. – С. 93–99.



I. A. Lyubchenko

## IMPROVING THE QUALITY OF POWER SUPPLY OF NON-TRAINING RAILWAY CONSUMERS

Irkutsk State Transport University

**Abstract:** The article discusses the possibilities of improving the quality of electricity supplied to the signaling, centralization and automatic blocking devices through the use of active harmonic conditioners. A computational model of the power supply scheme for signaling substations is presented. The total coefficients of harmonics in the presence and absence of active harmonic conditioners have been determined..

**Keywords:** electricity quality, auto-locking devices, active harmonics ratios.

### References

- [1] Arriilaga J., Bradley D.A., Bodger P.S., Power System Harmonics. John Wiley & Sons, New York, 1985. (Russ. ed.: Arrilaga D., Bredli D., Bodzher P. Garmoniki v elektricheskikh sistemakh. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 320 p.)
- [2] Dolinger S.Yu. et al. Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot snizheniya kachestva elektricheskoi energii v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses from the reduction of the quality of electric energy in the elements of power supply systems]. Omskii nauchnyi vestnik [The Journal Omsk Scientific Bulletin], 2013, No. 2(120), pp. 178–183.
- [3] Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
- [4] Kargin S.V., Krasnova A.N., Bekbulatov R.R. Upravlenie kachestvom elektroenergii v raspreditel'nykh setyakh obshchego naznacheniya [Energy quality management in general purpose distribution networks]. Moscow: NTF «Energoprogress» Publ., 2012, 108 p
- [5] German L. A. Ustrojstva i linii elektrosnabzheniya avtoblokirovki / L. A. German, M. I. Veksler, I. A. Shelom. – M.: Transport, 1987. – 192 s.
- [6] German L. A. Elektrosnabzhenie avtoblokirovki i elektricheskoy centra-lizacii / L. A. German, A.L. Kalinin. – M.: Transport, 1974. – 168 s.
- [7] Zakaryukin V. P. Modelirovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemah elektrosnabzheniya zheleznykh dorog / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov // Vestnik Rostov-skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – 2008. – № 3. – S. 93–99.

**А.В. Малеев, В.И. Пантелеев**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MATLAB ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Сибирский федеральный университет,  
Политехнический институт, г. Красноярск

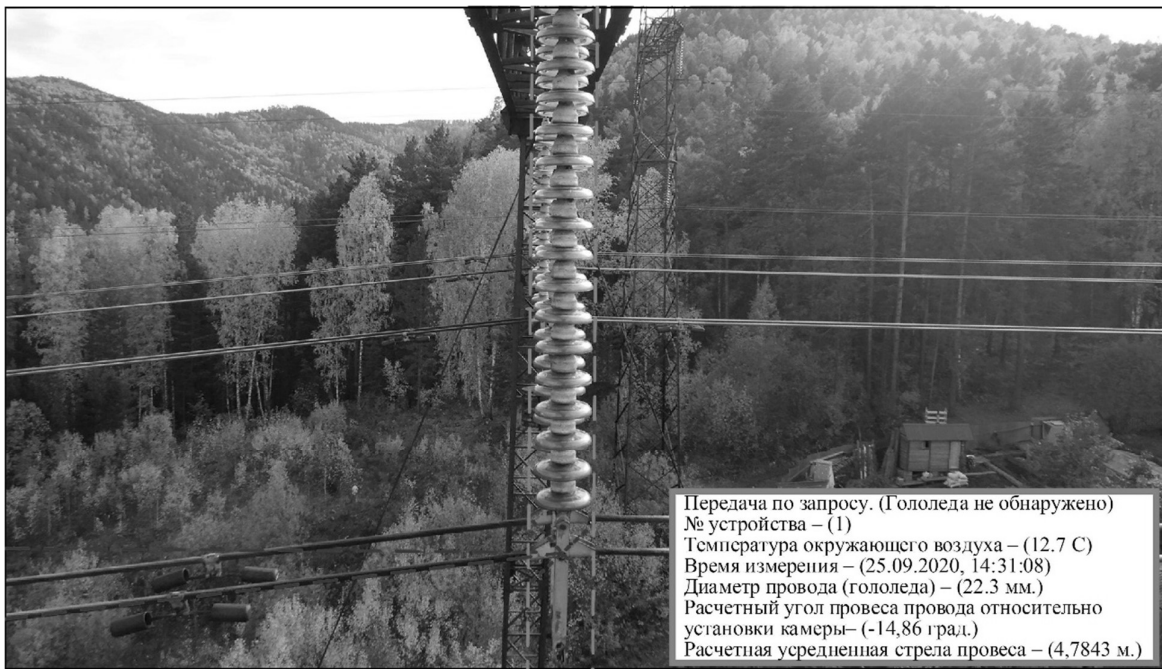
**Аннотация:** Авторами данной статьи в среде Matlab разработан программный комплекс для автоматизации расчетов стрелы провеса провода и грозозащитного троса воздушной линии электропередачи, результаты которых применяются в интеллектуальной системе контроля гололедообразования, а также при мониторинге прохождения линий электропередачи над ответственными инженерными сооружениями. Разработанный алгоритм, позволяет, после ввода исходных данных, автоматически получить зависимость функции угла наклона провода от стрелы его провеса.

**Ключевые слова:** линии электропередачи, интеллектуальные электрические сети, системы мониторинга гололедообразования, аппроксимация функций.

Стрела провеса является основополагающим параметром воздушных линий электропередачи, гарантирующим надёжность и безопасность их работы. На этапе проектирования, воздушные линии электропередачи рассчитываются с учетом изменения физических нагрузок на провода, опоры и линейную арматуру в зависимости от температуры окружающего воздуха, протекающих токов, гололедной обстановки и ветровой нагрузки [1]. Стрела провеса провода или ее изменение, в зависимости от внешних технологических и погодных условий, может являться информационной составляющей для создания систем диагностики и мониторинга в интеллектуальных электрических сетях.

В статье рассмотрен алгоритм, реализованный в программном комплексе Matlab, который позволяет автоматизировать расчеты стрелы провеса провода и грозозащитного троса воздушной линии электропередачи, применённый, например, в интеллектуальной системе контроля гололедообразования [2]. Источником информации для данной системы мониторинга является оптический сенсор (видеокамера), который размещается на опоре линии электропередачи в непосредственной близости от провода (с учетом допустимых изоляционных расстояний). Расстояние от оптического сенсора до провода обычно не превышает нескольких метров, поэтому на получаемое им изображение провода практически не влияют погодные условия. Система искусственного интеллекта, реализованная программно на микрокомпьютере, на фоне общего изображения выделяет провод, гирлянду изоляторов и фиксирующую провод арматуру, определяет средний диаметр провода, учитывая расстояние от оптического сенсора до

провода, рассчитывает угол провеса провода, стрелу провеса и массу гололедных отложений (см. рис. 1).



**Рис. 1. Фотография с прикрепленной технологической информацией анализируемого фрагмента провода линии 220 кВ**

Результаты разработанного программного комплекса для автоматизации расчетов стрелы провеса провода в среде Matlab также используются в автономной системе мониторинга прохождения линий электропередачи над ответственными инженерными сооружениями [3], см. рис 2. Датчик системы мониторинга размещается на фазном проводе в непосредственной близости от гирлянды изоляторов. Стрела провеса провода рассчитывается по результатам измерений нескольких физических датчиков, один из которых отслеживает угол наклона провода относительно горизонтального положения.

В рамках данной статьи рассматривается последовательность действий, позволяющая определить стрелу провеса провода с учетом геометрических размеров пролета линии электропередачи и точек крепления провода в поддерживающей арматуре. При расчете подвески провода используется прецизионный математический аппарат, позволяющий представить провод в виде «гибкой» нити, с использованием гиперболических функций [4]. Однако для практических расчетов автономными устройствами мониторинга прецизионные вычисления осложнены техническими особенностями применяемых микропроцессорных устройств и в общих случаях нецелесообразны. Применение общеизвестных математических зависимостей и программного комплекса Matlab позволили упростить «итоговые» математические выражения для обработки автономными комплексами мониторинга.

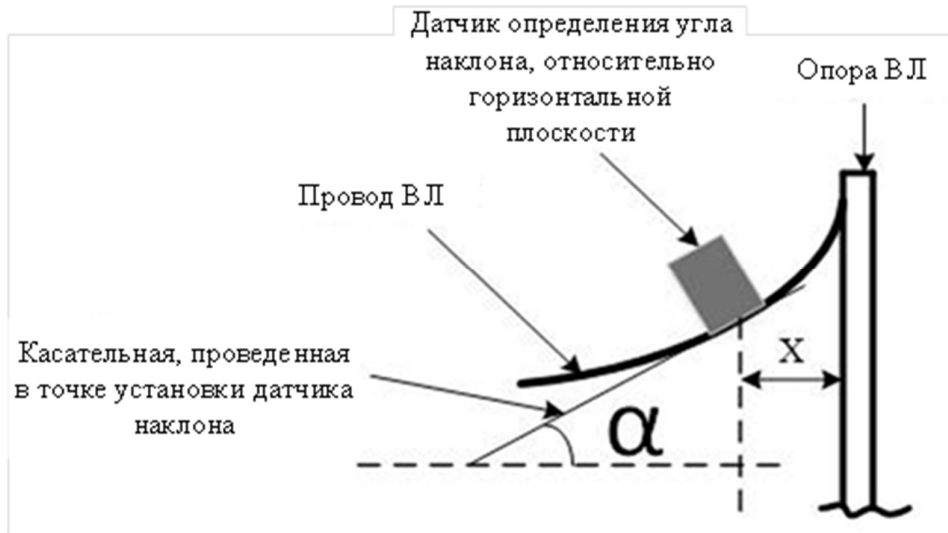


Рис. 2. Место установки автономного датчика определения угла наклона провода ВЛ

Далее рассмотрим последовательность обобщенных этапов, позволяющих посредством встроенных функций обработки эмпирических результатов в среде программирования Matlab получить аппроксимирующие выражения положения проводов воздушных линий электропередачи.

1. Вводятся основные параметры для расчета – длина пролета линии электропередачи, координаты крепления провода в поддерживающей арматуре, место фиксации системы мониторинга на фазном проводе и т.п.

2. На основании исходных данных производится расчет положения фазного провода или грозозащитного троса электропередачи по всем возможным траекториям провеса, от минимального положения с максимальной стрелой провеса, когда провод «касается» земли, до минимальной стрелы провеса, когда силы натяжения провода максимальны. При расчете используется математический аппарат с применением гиперболических функций.

3. Для каждой из возможных траекторий провеса провода на втором этапе с помощью модулей аппроксимации в Matlab подбирается степенная функция высокого порядка, позволяющая свести к минимуму погрешность аппроксимации, см. рис. 3.

4. Применение математического аппарата Matlab с использованием символьных вычислений позволяет в автоматическом режиме проинтегрировать аппроксимирующие функции в координатах установки системы мониторинга. Результатом дифференцирования являются непрерывные функции, записанные в виде математических зависимостей. Подстановкой текущих координат положения из системы мониторинга на проводе воздушной линии в функции, полученные после дифференцирования, получается дискретный набор значений, соответствующий определенной стреле провеса провода при определенном угле отклонения его от горизонтального положения.

5. Повторяется этап аппроксимации, полученных на четвертом этапе дифференциальных дискретных значений стрелы провеса провода как зависимости от угла его наклона в месте установки системы мониторинга. Результатом аппроксимации является непрерывная степенная функция, представленная на рис. 4.

Следует отметить, что расчеты, реализованные Matlab в символьном виде, позволяют обрабатывать сложные гиперболические зависимости, однако для практических задач при дискретных входных данных работа со степенными функциями наиболее оправдана.

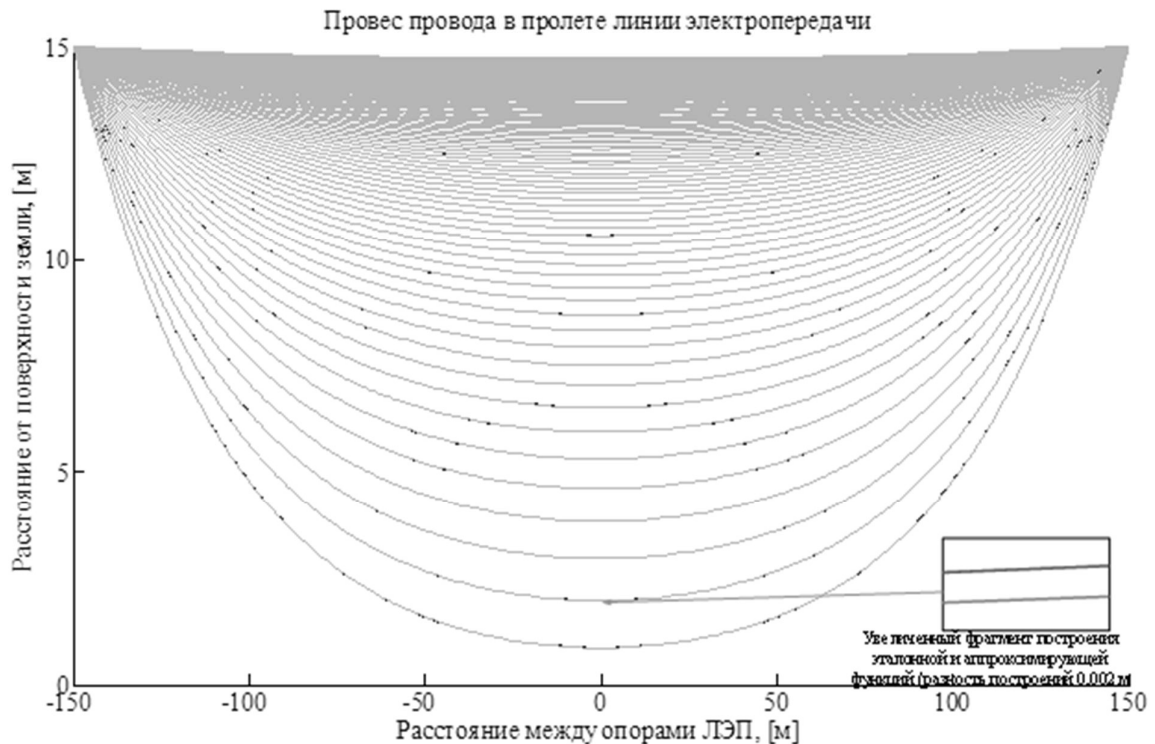


Рис. 3. Результаты расчета положения провода для типового пролета ВЛ 110 кВ

### Заключение

Механическому расчету линий электропередачи посвящено большое количество литературы, разработаны специальные программные комплексы, однако для решения реализованной авторской задачи мониторинга воздушных линий в среде Matlab был разработан алгоритм, позволяющий после ввода исходных данных автоматически получить зависимость функции угла наклона в требуемой точке провода от стрелы его провеса.

Полученные эмпирические зависимости характеризуются высокой точностью аппроксимации физического положения проводов воздушных линий, представлены в виде простых степенных функций, результаты расчета по которым могут быть реализованы простыми микропроцессорными устройствами.

Зависимость угла наклона провода, относительно уровня горизонта, в месте установки устройства мониторинга

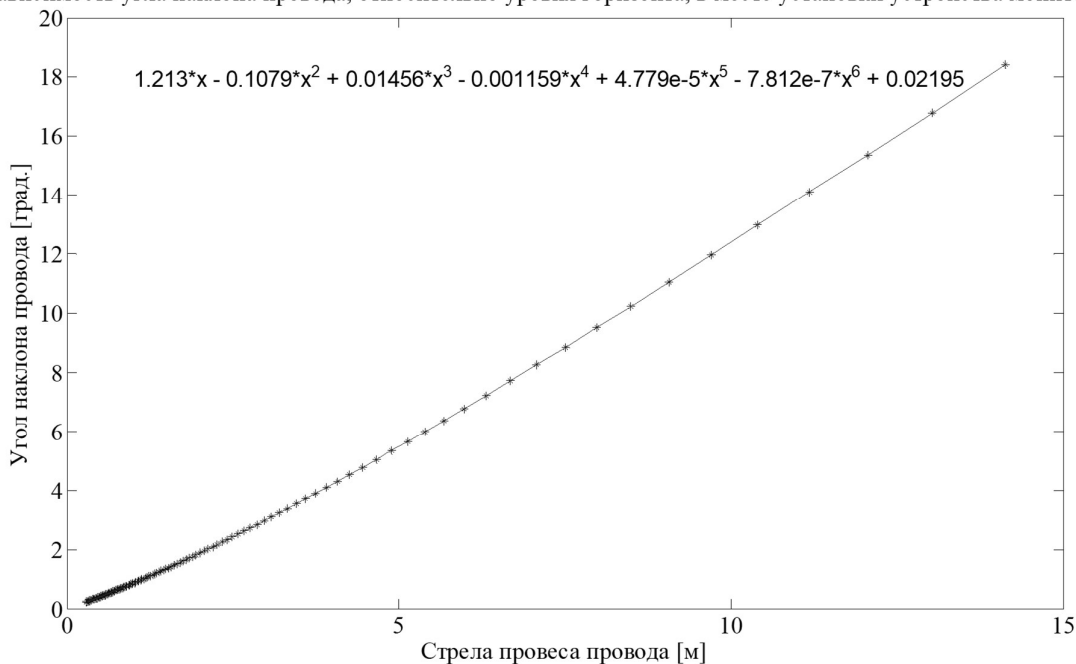


Рис. 4. Аппроксимирующая функция угла наклона провода от стрелы провеса

#### Библиографический список

1. **Крюков, К.П.** Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К.П. Крюков, Б.П. Новгородцев // Ленинград «Энергия», 2-е изд. 1979.
2. **Пантелеев, В.И.** Система мониторинга интенсивности гололедообразования на проводах воздушной линии электропередачи / В.И. Пантелеев, А.В. Малеев // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 74–80.
3. **Пантелеев, В.И.** Определение стрелы провеса проводов определение стрелы провеса проводов воздушных линий электропередачи в устройстве мониторинга гололедообразования по результатам физического моделирования / В.И. Пантелеев, А.В. Малеев // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 2. – с. 139-143.
4. **Меркин, Д.Р.** Введение в механику гибкой нити / Д.Р. Меркин - // М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980.

A.V. Maleev, V.I. Panteleev

## THE APPLICATION OF THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE FOR THE POWER LINES ERECTING SAG CALCULATIONS AUTOMATION

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

**Abstract:** The authors of this article have developed a software package in the Matlab environment for automating calculations of the erecting sag and lightning guard cable of the power lines. The results of the development were applied in the intelligent system for monitoring ice formation, as well as for power lines passage monitoring above responsible engineering structures. The developed algorithm allows automatically obtain the dependence of the angle's function inclination of the erecting sag after entering the initial data.

**Key words:** power transmission lines, intelligent electrical networks, ice formation monitoring systems, function approximation.

### References

- [1] Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P. “Konstrukcii i mehanicheskij raset linij elektroperedahi [*Structures and mechanical calculation of power transmission lines*]”, Leningrad Energia [*Leningrad "Energy"*], no. 2, 1979 (in Russian)
- [2] Panteleev V.I., Maleev A.V. “Sistema monitoring intensivnosti gololedoobrazowania na prowodah wozduhnoi linii elektroperedahi [*System for monitoring the intensity of ice formation on overhead power line wires*]”, Omskij nauhnij vestnik [*Omsk Scientific Bulletin*] ”., from 6, pp. 74-80, 2020 (in Russian)
- [3] Panteleev V.I., Maleev A.V. “Opredelenie streli prowesa prowdow wozduhnih linii elektroperedahi w ustroistwe monitoring gololedoobrazowania po rezultatam fiziheskogo modelirowania [*Determination of the wire sag boom determination of the wire sag boom of overhead power lines in the ice formation monitoring device based on the results of physical modeling*]”, Juzno-Sibirskij nauhnij vestnik [*South Siberian Scientific Bulletin*] ”., from 2, pp. 139-143, 2021 (in Russian)
- [4] Merkin D. R. “Wwedenie w mehaniku gibkoi niti [*Introduction to Flexible Thread Mechanics*]”, M. Nauka. [*M. Nauka. The main editorial office of the physical and mathematical literature*], 1980 (in Russian)

М.Н. Ползиков, А.С. Исаев

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ МЕНЕДЖМЕНТА ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Новомосковский институт РХТУ им.Д.И.Менделеева

**Аннотация:** В статье рассмотрена систематизация информационно-документальной базы руководителя электрохозяйства промышленного предприятия и классифицирована документация, используемая электротехническим персоналом для принятия решений на уровне главного энергетика, с целью формирования электронной базы данных документов электрохозяйства.

**Ключевые слова:** информационная база электрохозяйства, отдел главного энергетика, управление электрохозяйством предприятия.

Современные системы электроснабжения характеризуются большим количеством составляющих элементов, значительным числом контролируемых показателей, широким диапазоном скоростей протекающих процессов, возможностью появления электроопасных ситуаций и поэтому относятся к сложным человеко-машинным комплексам. Эффективным средством автоматизации обеспечения промышленного электроснабжения стали информационные сети, но их наличие не является достаточным условием для эффективного функционирования автоматизированной системы управления электрохозяйством промышленного предприятия. Для этого требуются постоянно совершенствуемая методология и средства управления.

Актуальность внедрения электронных ресурсов в процесс принятия решения менеджментом различного уровня обусловлена сокращением времени решения проблем, возникающих при электроснабжении. Повышение информационной обеспеченности решений руководителя позволит ускорить ликвидацию перерывов в электроснабжении и повысить надежность системы электроснабжения предприятия.

Научная новизна данного направления заключается в формировании единого подхода при создании электронных информационно-документальных баз структуры управления электрохозяйством с целью ускорения поиска информации различного характера (текст, графика, числовые данные) и упрощения процесса обновления данных баз.

Управление вещественными и информационными потоками электрохозяйства стало сложной в кибернетическом смысле задачей, решение которой в современных условиях невозможно без применения передовых информационных технологий.

Количество элементов СЭС и информация о них бывают настолько большими, что при принятии решения невозможно учесть все. Работа главного энергетика основывается зачастую на опыте и не обеспечена точными методиками,



разработанными в области электроснабжения. Модернизация схем электроснабжения и замена электрооборудования нередко производится на основе решений, принимаемых на интуитивном уровне. В таких случаях в условиях ограниченности временных ресурсов необходимо наличие систематизированной базы знаний, в доступной форме точно и четко описывающей методы, с помощью которых становится возможным научное обоснование принимаемых решений.

Анализ информации, существующей в виде различных учебников и руководств, и систематизация ее в виде информационной базы позволят качественно повысить уровень восприятия и понимания сложных явлений, процессов, принципов действия и конструкций, описываемых вербально и математически, и требующих высокого уровня абстракции мышления, пространственного воображения, скорости восприятия информации, часто превышающих возможности среднего инженера.

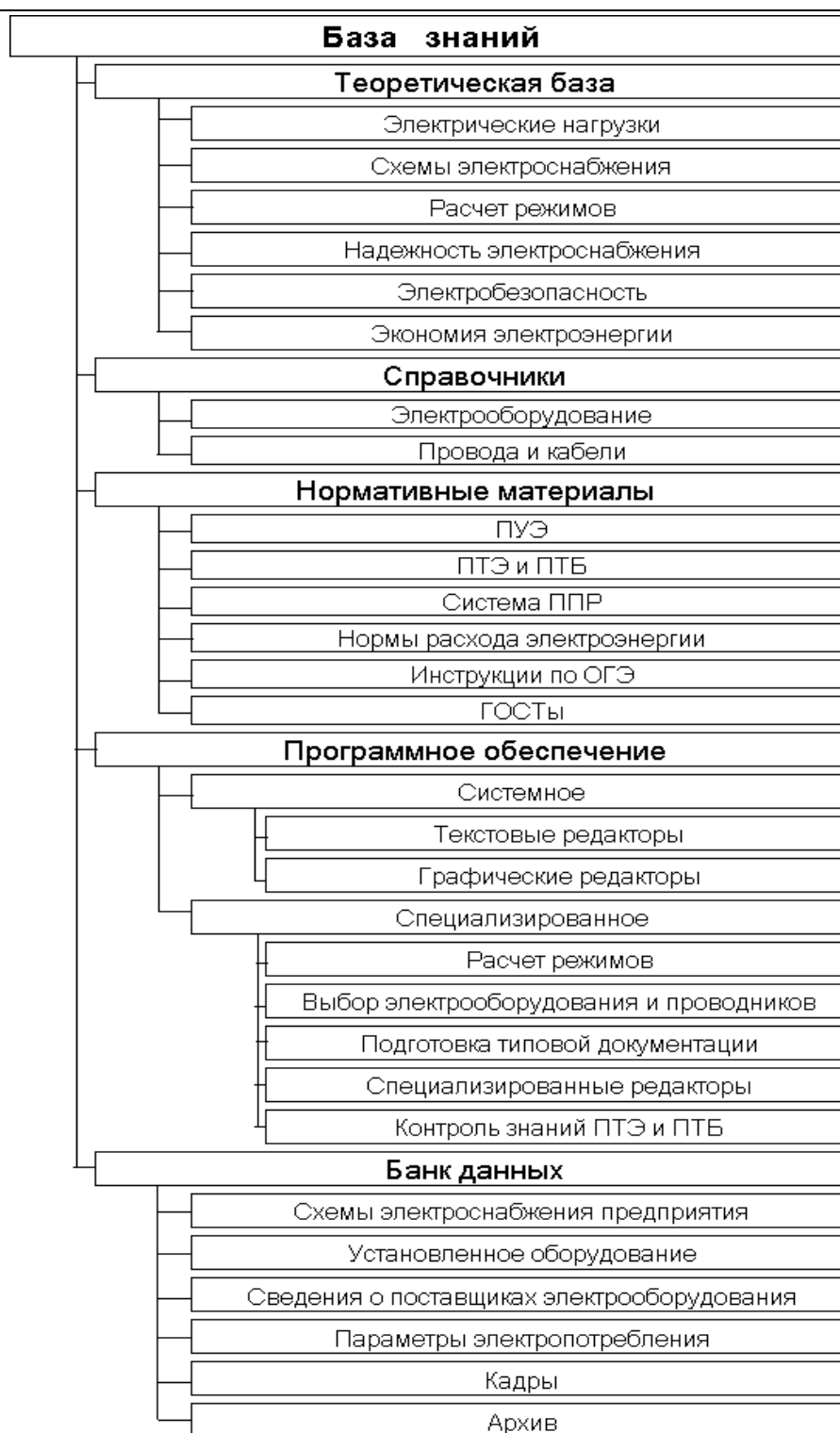
Повышение эффективности функционирования как системы проектирования и эксплуатации технически сложных объектов, так и системы вузовской подготовки инженеров-электриков предполагает решение актуальной задачи: создание информационной и методологической базы управления электрохозяйством промышленного предприятия.

Формирование структуры информационной базы необходимо основывать на иерархии уровней структуры управления электрохозяйством крупного промышленного предприятия. В данной структуре циркулируют информационные потоки, управление которыми требует больших трудозатрат. Возникает необходимость создания системы управления базами знаний и банками данных, специализированными для системы электроснабжения.

В настоящее время работа менеджера электрохозяйства обеспечена разрозненными электронными ресурсами, решающими узконаправленные задачи и обеспечивающие генерацию локальной информации по отдельным запросам. В результате для принятия решения руководителем приходится использовать несколько поисковых источников информации.

На примере Новомосковской минерально-химической компании, входящей в группу «Еврохим», проанализированы задачи, функции и нормативные документы, используемые отделом главного энергетика [1,2]. На основании анализа предложена структура базы знаний заместителя главного энергетика по электрохозяйству (рис. 1). Выделены основные составляющие структуры, включающие информационно-программное обеспечение всех задач главного энергетика.

Теоретическая база разработана на основании анализа последних научных исследований, заключенных в учебных пособиях и руководствах, и представляет собой конспективный гипертекст с активными ссылками и словами для более детального изучения того или иного вопроса [3].



**Рис. 1. Информационная база электрохозяйства предприятия**

Существование базовых нормативных документов, таких как ПУЭ, ПТЭ и ПТБ, ГОСТы и т.д., требует обязательного их использования в базе знаний. Отличие представления этих материалов в базе знаний от традиционного в полной

автоматизации работы с текстом (автоматизированный поиск нужного раздела, запоминание пути перемещения по тексту и т.д.)

Комплекс специализированного программного обеспечения позволит автоматизировать сбор, хранение и обработку данных по схемам электроснабжения и установленному и ремонтируемому электрооборудованию [4]. В эту часть структуры также входит автоматизированный расчет различных режимов систем электроснабжения (нормальных режимов, короткого замыкания, уставок релейной защиты). Информационное обеспечение функций структуры управления электрохозяйством приведена в таблице.

### Информационно-программное обеспечение электрохозяйства

	Т	С	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	П1	П2	П3	П4	П5	П6	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6
Энергосбережение	•		•		•	•	•	•			•	•			•	•		•		•
Учет электроэнергии	•		•	•		•	•	•			•	•			•	•		•		•
Прогнозирование параметров электропотребления	•					•			•	•						•		•		
Заявка энергетических ресурсов						•	•		•		•	•			•	•		•		•
Электроремонт	•	•	•	•	•			•		•	•				•	•	•			•
Соблюдение графиков ППР		•			•				•			•				•	•	•		•
Приемка ремонтных работ			•	•			•	•				•			•	•				•
Учет электрооборудования		•							•			•	•			•				•
Подготовка материалов и инструкций							•	•	•			•	•					•		•
Контроль знаний ПТЭ и ПТБ			•	•			•	•				•		•						•
Подготовка ТУ и заданий		•	•	•	•	•	•	•	•			•			•	•				•
Организация эксплуатации электрооборудования	•		•	•			•	•			•	•			•	•				•
Обеспечение оперативных переключений							•				•	•			•	•				•
Совершенствование схем электроснабжения	•		•	•	•					•	•		•		•	•	•			
Обеспечение безопасности труда			•	•			•	•										•		

Условные обозначения: Т - теоретическая база; С - справочники; Н1 - ПУЭ; Н2 - ПТЭ и ПТБ; Н3 - система ППР; Н4 - нормы расхода электроэнергии; Н5 - инструкции; Н6 - ГОСТы; П1 - системное программное обеспечение; П2 - расчет режимов; П3 - выбор электрооборудования и проводников; П4 - подготовка типовой документации; П5 - специализированные редакторы; П6 - контроль знаний ПТЭ и ПТБ; Б1 - схемы электроснабжения предприятия; Б2 - установленное оборудование; Б3 - сведения о поставщиках оборудования; Б4 - параметры электропотребления; Б5 - кадры; Б6 - архив технической документации.

Внедрение автоматизированной информационной базы в работу различных уровней электрохозяйства промышленного предприятия и создание автоматизированного рабочего места главного энергетика и руководителей различных уровней электрохозяйства требует разработки комплекса процедур для поиска

необходимой информации по проблеме по заданным условиям. Поиск информации может быть по ключевым словам в формулировке проблемы или задачи или(и) по набору электрических параметров. Пользователю предоставляется список документов или выдержки из них, необходимых для принятия решения. Обеспечен свободный выбор пользователем нужной ему информации.

Разработка системы управления базой знаний и базой данных требует разграничения доступа к базе знаний со стороны различных служб. Необходимо категорирование информации: общедоступная - предназначенная для всех подразделений управления электрохозяйством (например, теоретическая база, ПУЭ, ПТЭ и ПТБ, справочники, системное программное обеспечение, специализированные редакторы, установленное оборудование); только для чтения - используемая на одном уровне, может быть предоставлена другому только для ознакомления (например, невозможность изменения норм расхода электроэнергии со стороны электроцеха, разделение некоторых частей архива между ОГЭ и электроцехом); недоступная информация - часть базы, закрытая для нескольких уровней (например, инструкции, контроль знаний ПТЭ и ПТБ, складской резерв, кадры). Такое разделение позволит уменьшить объем обрабатываемой базы на конкретном уровне электрохозяйства, что сократит время на поиск и выдачу информации и ограничит число пользователей, имеющих право на изменение базы знаний.

### Выводы

1. Информационно-документальная база менеджмента электрохозяйства промышленного предприятия разрознена и не имеет строгой систематизации. Это приводит к увеличению времени поиска информации при принятии решения руководителем.

2. Создание единого подхода при формировании электронной информационно-документальной базы электрохозяйства позволит сократить время принятия решения менеджером электрохозяйства различного уровня, что в отдельных случаях приведет к ускорению решения проблем, а, следовательно, к повышению надежности и качества электроснабжения.

### Библиографический список

1. Инструкция об отделе главного энергетика Новомосковской минерально-химической компании АО «Еврохим».
2. Положение №НОТ-70 об электроцехе Новомосковской минерально-химической компании АО «Еврохим».
3. **Кудрин, Б.И.** Учебник по электроснабжению и его электронная версия. Новые информационные технологии в электротехническом образовании (НИТЭ-2003): Материалы VI международной научно-метод. конф. / Б.И. Кудрин, М.Н. Ползиков.- Астрахань, 2003. С.91-95
4. **Ползиков, М.Н.** Разработка автоматизированной системы обработки информации электрохозяйства промышленного предприятия. Промышленная энергетика: сборник научных трудов/ М.Н. Ползиков //РХТУ им. Д.И.Менделеева. Новомосковский институт. Новомосковск, 2000.- 204 с.: 63 ил. С.153-156.

M.N. Polzikov, A.S. Isaev

## SYSTEMATIZATION OF THE INFORMATION BASE OF MANAGEMENT OF THE ELECTRIC FACILITY OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE

Novomoskovsk Institute of the Mendeleev Russian Chemical Technology University

**Abstract:** The article considers the systematization of the information and documentary base of the head of the electric farm of an industrial enterprise and classifies the documentation used by the electrical personnel for decision-making at the level of the chief power engineer, in order to form an electronic database of electric farm documents

**Key words:** information base of the electric farm, department of the chief power engineer, management of the electric farm of the enterprise

### References

- [1] Instruction on the Department of the Chief Power Engineer of the Novomoskovsk Mineral and Chemical Company JSC Eurochem (in Russian)
- [2] Regulations №NOT-70 on the electrical shop of the Novomoskovsk mineral and chemical company JSC "Eurochem" (in Russian)
- [3] B.I. Kudrin, M.N. Polzikov, "Uchebnik po elektrosnabzheniyu i yego elektronnaya versiya. Novyye informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnicheskom obrazovanii (NITE-2003): Materialy VI mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskaya konferentsiya [Electricity textbook and its electronic version. New information technologies in electrotechnical education (NITE-2003): Proceedings of the VI International Scientific and Methodological Conference]", Moscow, pp. 91-95, 2003 (in Russian)
- [4] M.N. Polzikov, "Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy obrabotki informatsii elek-trokhozyaystva promyshlennogo predpriyatiya. Promyshlennaya energetika: sbornik nauchnykh trudov [Development of an automated information processing system for the electrical economy of an industrial enterprise. Industrial power engineering: collection of scientific papers]", RKhTU im. D.I. Mendeleev. Novomoskovsk Institute. Novomoskovsk, pp. 153-156, 2000 (in Russian)

Н.Г. Семенова, Н.А. Игнатьев

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА  
КЛАСТЕРИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ЗНАЧЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА РОСТА  
НАГРУЗКИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

**Аннотация:** В статье авторами с помощью коэффициента роста нагрузки условно выделены три группы СЭС: развивающиеся, стабильно функционирующие, угасающие. Также авторами разработан алгоритм *k-means* с использованием метрики «Евклидово расстояние» для кластеризации СЭС повышающих насосных станций коммунально- сетевого предприятия ООО «Оренбург водоканал» по коэффициенту роста нагрузки, программно- реализованный в Mathcad-е.

**Ключевые слова:** кластеризация, система электроснабжения, коэффициент роста нагрузки.

Одним из основных параметров при составление перспективного плана развития системы электроснабжения (СЭС) предприятия является период, на который составляется этот план. Чаще всего этот период может составлять от одного года до десяти лет. Одним из ключевых моментов при составлении краткосредне- и долгосрочного плана развития СЭС является состояние и перспективы развития самого предприятия: будет ли в этот период осуществлена модернизация, реконструкция, расширение или сокращение производства, т.е. должно быть определено будет ли рост потребления электрической энергии предприятием или нет.

При изучении научно-технической литературы нами было замечено, что все системы электроснабжения предприятий, в зависимости от значения коэффициента роста нагрузок  $K_{рн}$ , можно условно разделить на три основные группы: *развивающиеся* СЭС ( $K_{рн} > 1$ ), *стабильно функционирующие* СЭС ( $K_{рн} = 1$ ), *угасающие* СЭС ( $K_{рн} < 1$ ) [1]. Под *коэффициентом роста нагрузки* понимаем отношение потребления электроэнергии предприятием в расчетном году  $P_p$  к потреблению электроэнергии в предыдущем  $P_n$  [2]:

$$K_{рн_{ij}} = \frac{P_p}{P_n} \quad (1)$$

Нами было решено автоматизировать процесс *кластеризации* систем электроснабжения предприятий, который позволял бы осуществить кластерный анализ СЭС по коэффициенту роста нагрузки. Основное назначение кластерного

анализа заключается в разбиении множества объектов на однородные группы. В нашем случае под множеством объектов мы понимаем СЭС предприятий, а под однородными группами (кластерами) – это СЭС предприятий, имеющих приблизительно одинаковые значения коэффициентов роста нагрузки.

В качестве примера были рассмотрены объекты коммунально-сетевого предприятия ООО «Оренбург водоканал» - *повышающие насосные станции* (ПНС), расположенные в жилом районе города. ПНС предназначена для обеспечения требуемого уровня давления в водоснабжающей сети. Она оснащена асинхронными электродвигателями, которые входят в состав насосного агрегата и потребляют основную часть электроэнергии объекта. Также в состав входят блоки управления, устройства автоматики и датчики, с помощью которых обеспечивается заданное давление. В табл. 1 представлены значения потребляемой мощности рассматриваемых ПНС за период с 2016 по 2020 г.

Таблица 1

**Потребляемая мощность повышающих насосных станций по годам**

№п/п	Название объекта	2016 г	2017 г	2018 г	2019 г	2020г
		Тыс./кВт				
1	ПНС "18 мкр." ул. Салмышская	18,451	109,871	108,770	94,374	85,587
2	ПНС 4-го подъёма ул. Волгоградская	62,769	80,020	102,382	209,149	283,784
3	ПНС ул. Чкалова, 23мк	82,956	83,223	72,370	68,094	59,256
4	ПНС ул. Розы Люксембург	25,494	148,312	140,620	168,271	184,876
5	ПНС ул. Заречная	15,152	14,023	16,436	15,523	15,634

В данном исследовании для кластеризации множества СЭС ПНС использован *алгоритм k-means* (k-средних), основанный на итерационном методе [3]. Данный алгоритм предполагает перерасчет на каждом шаге итерации координаты центров каждого кластера и определение объектов (СЭС ПНС), принадлежащих каждому кластеру по условию минимизации расстояния от объекта (СЭС ПНС) до центра. Итерационный процесс заканчивается при условии неизменности значений, координат центров каждого кластера на последующем и предыдущем шагах, в этом случае на двух смежных итерациях должны оставаться неизменными подмножества СЭС ПНС, принадлежащих каждому

кластеру. В исследовании под координатами центров каждого кластера и объектов (СЭС ПНС) понимаем значения коэффициентов роста нагрузки.

В качестве меры расстояния между объектом и центром кластера в работе использована метрика «Евклидово расстояние».

Рассмотрим пошагово алгоритм *k-means* с использованием метрики «Евклидово расстояние» в соответствии с поставленной задачей:

**1. Задаем исходные данные и определяем коэффициенты роста нагрузки каждой ПНС.** Исходными данными является потребляемая мощность объектов, см. табл. 1. Коэффициент роста нагрузки находим по формуле (1).

**2. Определяем количество кластеров и задаём их центры.**

В начале статьи нами было выделено три группы СЭС предприятий, поэтому количество кластеров будем считать равным 3-м. Случайным образом зададим центры каждого кластера  $C_{i(0)}$ :

- 1-й кластер «Развивающиеся СЭС»:  $C_{1(0)}=1,07$ ;

- 2-й кластер «Стабильно функционирующие СЭС»:  $C_{2(0)}=1$ ;

- 3-й кластер «Угасающие СЭС»:  $C_{3(0)}=0,93$ .

**3. Определяем расстояние от каждого объекта СЭС ПНС до центров кластеров**

Эти расстояния определяем с помощью метрики расстояние Евклида:

$$d_{Eij} = \sqrt{(x_i - y_j)^2} \quad , \quad (2)$$

где  $x_i$  - координата СЭС ПНС (коэффициент роста нагрузки);  $y_j$  – координата центра кластера.

**4. Определяем принадлежность каждой СЭС ПНС к одному из трех кластеров.**

Критерием принадлежности объекта к кластеру является наименьшее расстояние от объекта до центра выделенных трех кластеров:

$$d_{Eij} = \min. \quad (3)$$

В результате этого операционного действия получим три подмножества СЭС ПНС (кластера) со своими новыми центрами.

**5. Корректировка координат центров полученных подмножеств СЭС ПНС.**

Корректировка координат центров каждого подмножества определяется как средне арифметическое координат каждой СЭС ПНС, вошедшей в рассматриваемый кластер:

$$C_{i(1)} = \sum C_{i(0)} / n, \quad (4)$$

где  $n$  – количество СЭС ПНС, вошедших в кластер.

**6. Определение расстояние от каждого объекта (СЭС ПНС) до вновь определенных центров кластеров**



После того как найдены новые центры кластеров, для каждой СЭС ПНС снова определяется ближайший к ней центр по формуле (2) и ее отношение к соответствующему кластеру.

Далее опять выполняются пункты с 3-5. Итерационный процесс закончится, когда перестанет изменяться перечень элементов подмножеств СЭС ПНС, принадлежащих каждому кластеру.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма *k-means* с использованием метрики «Евклидово расстояние».

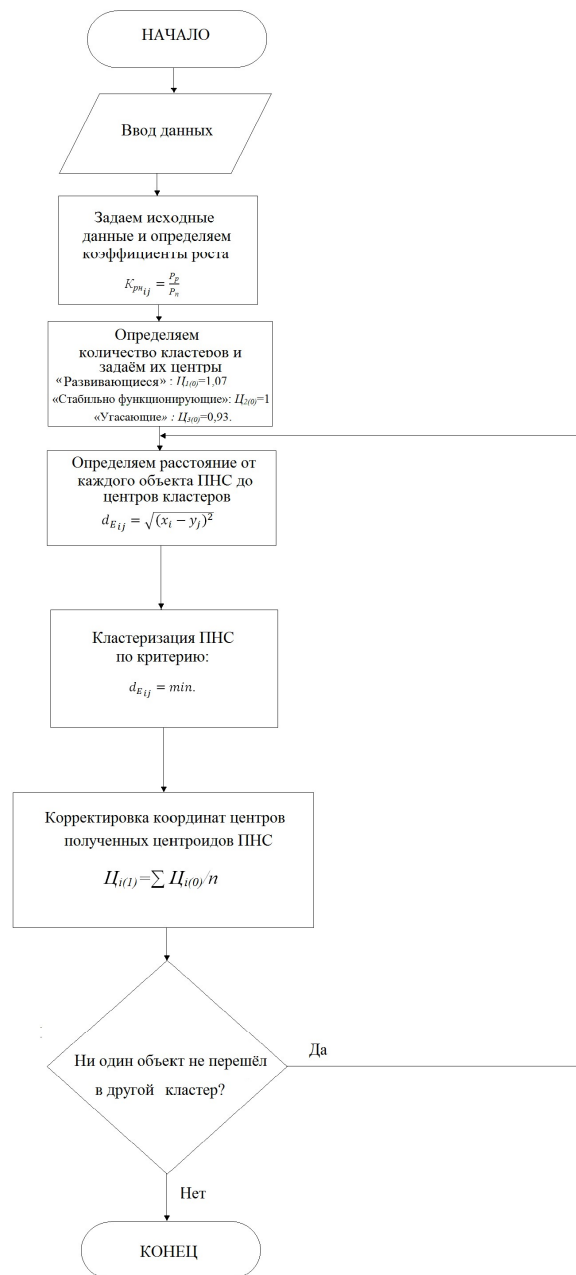


Рис. 1. Блок схема алгоритма *k-means* с использованием метрики «Евклидово расстояние»

Разработанный алгоритм был реализован с помощью программы Mathcad. Полученные результаты показали, что проведенная кластеризация СЭС повышающих насосных станций коммунально-сетевого предприятия ООО «Оренбург водоканал» по коэффициенту роста нагрузки позволила отнести:

- к группе «Развивающиеся СЭС» - СЭС ПНС под №2, 4, расположенных по улицам Розы Люксембург и Волгоградская, соответственно;
- к группе «Стабильно-функционирующие СЭС» - СЭС ПНС под №5, расположенной на улице Заречной;
- к группе «Угасающие СЭС» - СЭС ПНС под номерами №1, 3, расположенных по улицам Салмышская и Чкалова.

#### **Выводы**

1. Условно выделены по коэффициенту росту нагрузки три группы СЭС: развивающиеся, стабильно функционирующие, угасающие.

2. Разработан алгоритм **k-means** с использованием метрики «Евклидово расстояние» для кластеризации СЭС повышающих насосных станций коммунально-сетевого предприятия ООО «Оренбург водоканал» по коэффициенту роста нагрузки, программно реализованный в Mathcad.

3. Получены следующие результаты кластеризации: к группе «Развивающиеся СЭС» отнесены СЭС ПНС, расположенные по улицам Розы Люксембург и Волгоградская; к группе «Стабильно-функционирующие СЭС» отнесена СЭС ПНС, расположенная по улице Заречной; к группе «Угасающие СЭС» отнесены СЭС ПНС, расположенные по улицам Салмышская и Чкалова.

#### **Библиографический список**

1. **Семенова, Л.А.** Разработка методики принятия решения по развитию системы электропитания с применением технoценoлогического подхода и теории нечетких множеств - дис. кандидата тех. наук – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010.
2. **Семенова, Н.Г.** Классификация систем электроснабжения по значению коэффициента роста нагрузки / Н.Г. Семенова, Н.А. Игнатьев // Всероссийская научно-методическая конференция «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». - Оренбург: ОГУ, 2021. - С. 3014-3017.
3. **Миркин, Б. Г.** Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор: препринт WP7/2011/03] / Б. Г. Миркин – М. : Изд. дом Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 2011. – 88 с.

**N. G. Semenova, N. A. Ignatiev**

**AUTOMATION OF THE PROCESS OF CLUSTERING OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF ENTERPRISES BY THE VALUE OF THE LOAD GROWTH FACTOR**

Federal State Budgetary Educational  
Institution of Higher Education  
«Orenburg State University»

**Abstract:** In the article, the authors use the load growth coefficient to conditionally identify three groups of SES: developing, stably functioning, and fading. The authors also developed the k-means algorithm using the "Euclidean distance" metric for clustering SES of boosting pumping stations of the Orenburg Vodokanal utility company based on the load growth coefficient, which is programmatically implemented in Mathcad.

**Keywords:** clustering, power supply system, load growth factor.

**References**

- [1] Semenova, L. A. Development of methods of decision-making on the development of the electricity system with the use of tehnoloogiatega approach and fuzzy set theory - dis. candidate of technical Sciences, Ekaterinburg: Ural state technical University, 2010.
- [2] Semenova, N. G. Ignatiev N. And. Classification of power supply systems by the value of the growth factor loads of all-Russian scientific-methodical conference "University complex as regionalnych of education, science and culture." - Orenburg: OSU, 2021. - pp. 3014-3017.
- [3] Mirkin, B. G. Methods of cluster analysis for decision support: review: preprint WP7 / 2011 / 03] / National Research University "Higher School of Economics". - M.: Publishing House of the National Research University "Higher School of Economics", 2011. - 88 p.

Е.Н. Соснина, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье приведены результаты исследования влияния твердотельных регуляторов напряжения для электрической сети 6-20 кВ на показатели качества электроэнергии по несинусоидальности напряжения с использованием расчетно-аналитической и имитационной моделей регулятора.

**Ключевые слова:** регулирование величины и фазы напряжения, твердотельные регуляторы, несинусоидальность напряжения.

Устройства автоматического регулирования величины и фазы напряжения относятся к элементам активно-адаптивного управления параметрами и конфигурацией электрических сетей [1-3]. Применение данных устройств выполняет функцию адаптации сети к текущему режиму ее работы, и позволяет:

- обеспечить оптимальный уровень напряжения у потребителей при разных длинах питающих линий, в результате чего регуляторы РПН районных понизительных подстанций могут не обеспечивать требуемый уровень напряжения у конечных потребителей;
- обеспечить оптимальное распределение потоков активной и реактивной мощности в сложных замкнутых электрических сетях;
- увеличить пропускную способность электрических сетей, снизить потери активной мощности при передаче.

Учеными НГТУ разработан твердотельный регулятор вольтодобавочного напряжения (ТРВДН), представляющий собой автоматический тиристорный регулятор величины и фазы напряжения с параллельным и последовательным трансформаторами [4].

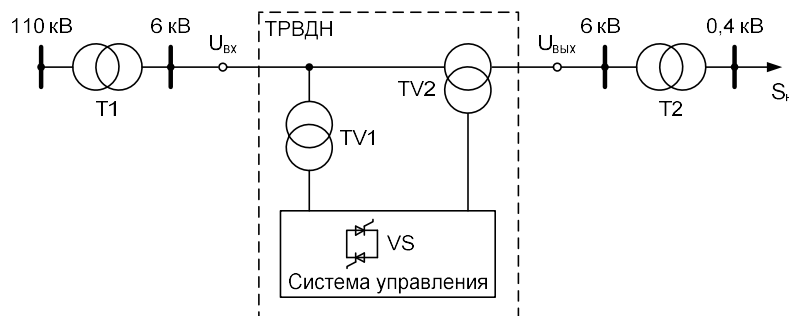


Рис.1. Однолинейная схема распределительной электрической сети с ТРВДН

На рис. 1 приведена однолинейная схема распределительной электрической сети с ТРВДН.

Силовая часть ТРВДН содержит параллельный трансформатор TV1 и последовательный трансформатор TV2. Первичные обмотки трансформатора TV1 подключены к входным зажимам ТРВДН (сеть 6-20 кВ). Его вторичные обмотки через тиристорные коммутаторы VS системы управления подключены к первичным обмоткам трансформатора TV2. Вторичные обмотки трансформатора TV2, включенные между входными ( $U_{\text{вх}}$ ) и выходными ( $U_{\text{вых}}$ ) зажимами ТРВДН (в расщелку линии), вносят продольно-поперечную составляющую напряжения, регулируемую тиристорными коммутаторами по фазе и величине.

Система управления ТРВДН включает модули продольного и поперечного регулирования, выполненные на тиристорных коммутаторах. Модуль продольного регулирования реализует регулирование величины, а модуль поперечного регулирования - фазы выходного напряжения ТРВДН относительно входного. Оба модуля с помощью принятых схемных соединений тиристорных коммутаторов могут быть включены или исключены из цепи питания первичных обмоток трансформатора TV2. Совместное использование модулей поперечного и продольного регулирования позволяет реализовать продольно-поперечное регулирование выходного напряжения ТРВДН.

Данное устройство предназначено для использования в сети среднего напряжения (6-20 кВ), и обеспечивает регулирование величины выходного напряжения относительно входного в диапазоне  $\pm 10\%$  и изменение угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного в диапазоне  $\pm 5^\circ$ .

В конструкции ТРВДН использованы тиристорные коммутаторы, которые при своей работе вносят искажения в форму выходного напряжения, генерируют электромагнитные помехи в виде высших гармонических составляющих напряжения и тока, и таким образом оказывают влияние на электромагнитную совместимость устройства. Параметры электромагнитных помех характеризуются показателями качества электрической энергии, допустимый уровень которых нормируется ГОСТ 32144-2013 [5]. Высшие гармонические составляющие определяют показатели качества, относящиеся к несинусоидальности напряжения. В соответствии с [5], к этим показателям относятся значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $KU(v)$  и значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $KU$ .

Для оценки влияния ТРВДН на несинусоидальность напряжения в электрической сети разработана расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети с ТРВДН [6].

В аналитической модели рассматривается схема участка электрической сети с ТРВДН, показанная на рис. 2.

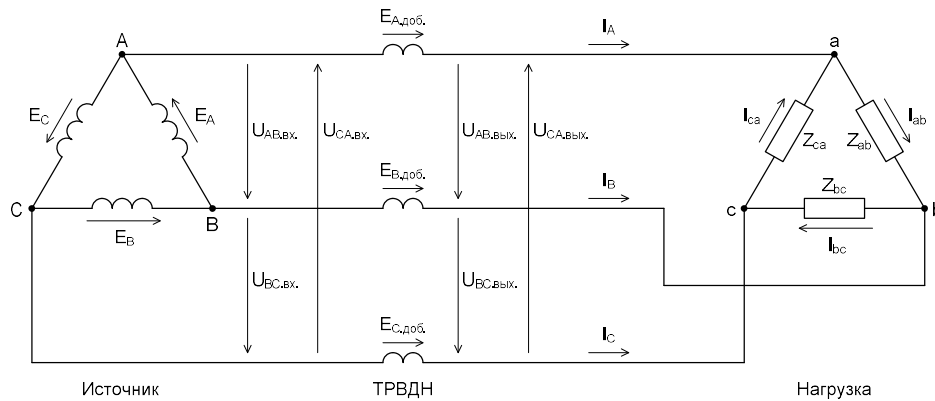


Рис.2. Схема участка электрической сети с ТРВДН

В данном случае, источником питания является трансформатор районной понизительной подстанции 110/6(10,20) кВ, вторичные обмотки которого соединены по схеме "треугольник". Обмотки ТРВДН включены последовательно, в рассечку линии 6-20 кВ. В качестве нагрузки представлены эквивалентные сопротивления системы "трансформатор (6(10,20)/0,4 кВ) - нагрузка", первичные обмотки трансформатора соединены по схеме "треугольник".

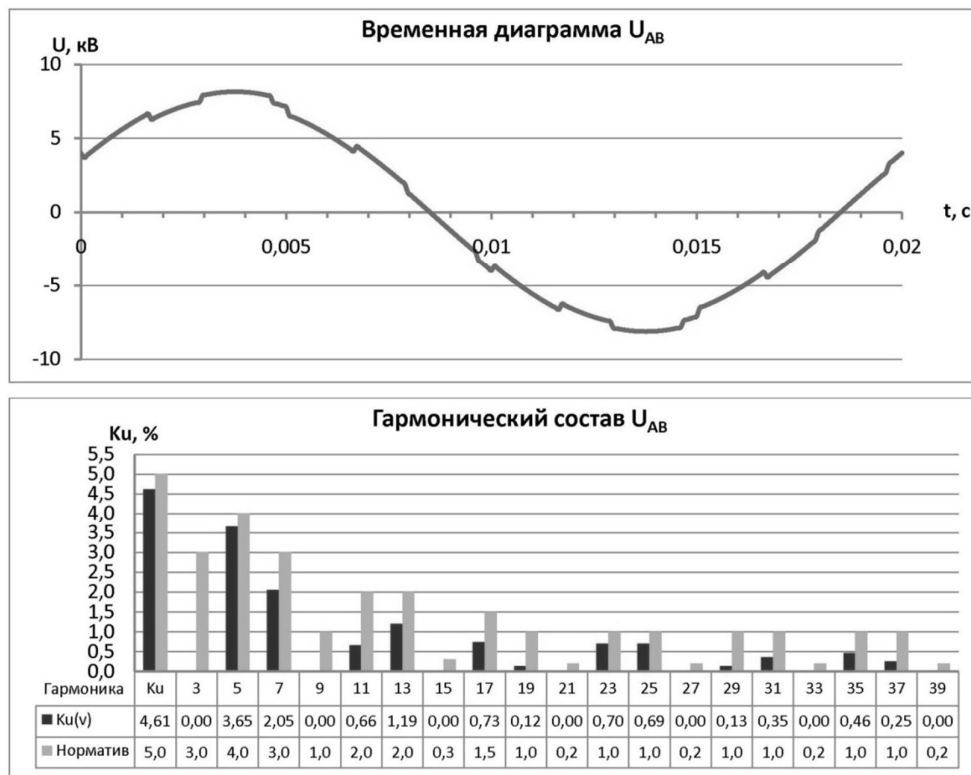
В математическом аппарате модели заложены выражения, описывающие мгновенные значения напряжений источника питания и модулей продольного и поперечного регулирования, а также токов нагрузки, обусловленных данными напряжениями. Указанные величины определяются отдельно и затем суммируются, по полученным результатам строятся кривые напряжений и токов на выходе ТРВДН. Гармонический состав данных кривых напряжений и токов определяется разложением полученных кривых в ряд Фурье.

Модель позволяет проводить исследования гармонического состава напряжений и токов ТРВДН в различных режимах его работы при различных значениях угла управления тиристорами в диапазоне  $(0-180)^\circ$  (один полупериод), при активной нагрузке и при активно-индуктивной нагрузке с различными значениями угла  $\varphi$ .

В результате исследований, выполненных с использованием разработанной аналитической модели ТРВДН, установлено, что при работе ТРВДН генерируются нечетные гармоники напряжения, не кратные трем. При этом во всех режимах работы ТРВДН значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(v)}$  и коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_U$  на выходе ТРВДН не превышают нормативов, установленных ГОСТ 32144-2013 для сетей 6-25 кВ.

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_U$  на выходе ТРВДН зафиксировано в размере 4,61% при установленном ГОСТ нормативном значении 5%. Данное значение соответствует режиму работы ТРВДН при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi=0,5$ . На рис. 3 показана диаграмма линейного напряжения фазы АВ на выходе ТРВДН и его гармонический

состав в данном режиме работы ТРВДН, в сравнении с нормируемыми ГОСТ значениями.



**Рис.3. Диаграмма напряжения  $U_{AB}$  на выходе ТРВДН и его гармонический состав в режиме работы ТРВДН с максимальным зафиксированным значением коэффициента несинусоидальности напряжения**

Применяемая для исследований аналитическая модель позволяет обеспечить максимальную "прозрачность" получаемых результатов исследования, однако в силу трудоемкости учета множества различных параметров, влияющих на работу устройства, предполагает введение ряда упрощений и допущений, которые могут приводить к погрешности полученных результатов. Поэтому авторами проведена проверка полученных результатов с использованием имитационного моделирования в графической среде MATLAB Simulink [7]. Имитационное моделирование позволяет снизить трудоемкость процесса построения модели за счет использования стандартных блоков среды моделирования. Однако при этом в ряде случаев может возникать проблема оценки корректности работы и взаимодействия отдельных узлов модели, и в конечном итоге - корректности работы всей модели в целом, что затрудняет проверку достоверности получаемых результатов моделирования. Совместное же использование аналитической и имитационной моделей позволяет при сопоставлении получаемых результатов оценить корректность работы моделей и принимаемых допущений.

Описание имитационной модели ТРВДН приводится в [7]. Сопоставление данных, полученных с использованием аналитической и имитационной моделей, показывает расхождение результатов на уровне не более 3,5%, что обеспечивает

приемлемую погрешность вычислений для инженерных электротехнических расчетов.

### Выводы

1. Разработана расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети с ТРВДН, позволяющая определять гармонический состав напряжений и токов на выходе ТРВДН в различных режимах его работы с различными параметрами нагрузки.

2. Применение тиристорных регуляторов напряжения в электрических сетях вызывает искажения гармонического состава тока и напряжения, т.е. приводит к возникновению электромагнитных помех в виде высших гармонических составляющих, которые оказывают влияние на электромагнитную совместимость устройства.

3. Проведенные исследования, выполненные с использованием разработанной модели показали, что при работе устройства генерируются нечетные гармоники напряжения и тока, не кратные трем. Установлено, что во всех режимах работы устройства значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(v)}$  и коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_U$  не превышают нормативов, установленных ГОСТ 32144-2013 для сетей 6-25 кВ.

4. Сопоставление данных, полученных с использованием аналитической и имитационной моделей, показывает приемлемую погрешность вычислений для инженерных электротехнических расчетов.

### Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Решение проблем при переходе электроэнергетики на цифровые технологии //Интеллектуальная электротехника, 2018. -1(1). –С.9-25.
2. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №5. – С. 25–28.
3. Sosnina, E., Loskutov, A., Sevostyanov, A., Bedretdinov, R. EMC research of transformer-Thyristor regulator 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017, 2017-January, с. 1-6
4. Пат. на полезную модель №157116. Полупроводниковое фазоповоротное устройство. Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А. 2016. Бюл. № 3.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Стандартинформ, 2013. - 16 с.
6. **Солнцев, Е.Б.** Расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети 6-20 кВ с тиристорным регулятором напряжения / Е.Б. Солнцев, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев // Интеллектуальная электротехника, 2018, № 2(2). С. 39-52.
7. **Солнцев, Е.Б.** Разработка имитационной модели тиристорного регулятора напряжения / Е.Б. Солнцев, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев // Интеллектуальная электротехника, 2018, № 4(4). С. 90-99.



E.N. Sosnina, S.A. Petritsky, S.N. Yurtaev, A.M. Mamonov, A.N. Fitasov

## STUDY OF THE EFFECT OF SOLID STATE REGULATORS VOLTAGE ON POWER QUALITY INDICATORS

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva

**Abstract:** The article presents the results of a study of the influence of solid-state voltage regulators for a 6-20 kV electrical network on the quality indicators of electrical energy in terms of voltage nonsinusoidality using the calculation-analytical and simulation models of the regulator.

**Key words:** regulation of the magnitude and phase of voltage, solid-state regulators, non-sinusoidal voltage.

### References

- [1] A.B. Loskutov “Resheniye problem pri perekhode elektroenergetiki na tsifrovyye tekhnologii [Solving problems in the transition of the electric power industry to digital technologies]”, *Intellektual'naya elektrotekhnika [Intellectual electrical engineering]*, pp. 9-25, 2018 (in Russian)
- [2] E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov “Osnovnyye napravleniya razvitiya intellektual'nykh elektricheskikh setey na osnove adaptivnogo upravleniya [The main directions of development of intelligent electrical networks based on adaptive control]”, *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont [Electrical equipment: operation and repair]*, no. 5, pp. 25-28, 2012 (in Russian)
- [3] Sosnina, E., Loskutov, A., Sevostyanov, A., Bedretdinov, R. EMC research of transformer-Thyristor regulator 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017, 2017-January, c. 1-6
- [4] Pat. for utility model No. 157116. Semiconductor phase-shifting device. Asabin A.A., Verkhovskiy S.Ya., Sosnina E.N., Gardin A.I., Bedretdinov R.Sh., Kisel D.A. 2016. Bul. No. 3.
- [5] GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. - M.: Standartinform, 2013. -- 16 p.
- [6] E.B. Solntsev, S.A. Petritsky, S.N. Yurtaev, “Raschetno-analiticheskaya model' uchastka raspredelitel'noy elektricheskoy seti 6-20 kV s tiristornym regulyatorom napryazheniya [Calculation and analytical model of a 6-20 kV electrical distribution network section with a thyristor voltage regulator]”, *Intellektual'naya elektrotekhnika [Intellectual electrical engineering]*, no. 2(2), pp. 39-52, 2018 (in Russian)
- [7] E.B. Solntsev, S.A. Petritsky, S.N. Yurtaev, “Razrabotka imitatsionnoy modeli tiristornogo regulyatora napryazheniya [Development of an imitation model of a thyristor voltage regulator]”, *Intellektual'naya elektrotekhnika [Intellectual electrical engineering]*, no. 4(4), pp. 90-99, 2018

М.И. Фурсанов<sup>1</sup>, П.А. Сазонов<sup>2</sup>, А.А. Дашковский<sup>3</sup>

## МЕХАНИЗМ РАСЧЕТА И ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Белорусский национальный технический университет<sup>1</sup>

ОАО «Белэлектромонтажналадка»<sup>2</sup>

СООО «Мобильные ТелеСистемы»<sup>3</sup>

**Аннотация:** В статье представлен авторский метод расчета режимов (включая формулы, таблицы) и определения нагрузки в узлах с применением данных от цифровых приборов учета, АСКУЭ и основными критериями: скорость работы алгоритма, минимум входящего/исходящего сетевого трафика, минимальное падение точности расчета при росте числа неизвестных переменных нагрузки в электроэнергетических системах при не-явном количестве неизвестных переменных. Приведены преимущества предлагаемого метода по сравнению с классическими методами расчета режимов и прямым опросом технических средств систем АСКУЭ.

**Ключевые слова:** методы расчета режимов, цифровые средства контроля и учета энергии, электрическая нагрузка, падение напряжения, оптимизация, определение режима, электрическая сеть, электрическая система, программное обеспечение, формирование БД, математическая модель.

### Введение

Современная электроэнергетическая система (ЭЭС) предъявляет новые требования к разработке теории и методов анализа, используемых для расчета параметров режимов. В настоящее время существует огромное количество программных решений, реализующих различные методы. Условия централизованного энергоснабжения в рамках ЭЭС привели к разработке методик расчета на основе ее упрощенной модели.

В качестве рассматриваемых режимов электроэнергетических систем рассматриваются установившиеся (режимы максимальных и минимальных нагрузок) и аварийные режимы. Основными параметрами, характеризующими режим работы ЭЭС, являются протекаемые мощности, потери электроэнергии, уровни напряжений [1].

Методы расчета режимов можно распределить на две глобальные группы: прямые и итерационные. К прямым относятся методы, позволяющие получить решение в результате конечного числа арифметических операций, зависящего только от вычислительной системы, а также от порядка и структуры матрицы коэффициентов системы уравнений (метод Гаусса, Крамера и т.д.). К итерационным относятся методы, с помощью которых решение системы линейных алгебраических уравнений получается как предел последовательных приближений, вычисляемых посредством единообразных операций (метод простой итерации, метод Зейделя, градиентные методы и др.). К итерационным методам можно

отнести и приведенную в работе авторскую методику расчета и динамического мониторинга нагрузки в электрической сети [2-4].

### Основная часть

Для изложения сути метода определения загруженности электрической сети в реальном времени можно рассмотреть рис. 1 и 2. На рис. 1 представлена модель простейшей распределительной электрической сети 10/0,4 кВ работающая в режиме минимальной загруженности трансформатора и линии.

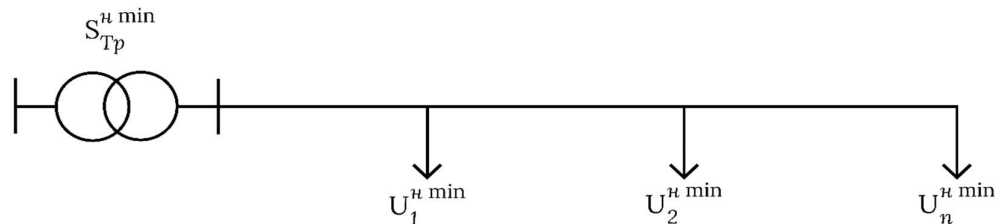


Рис. 1. Уровни напряжений у потребителей при минимальной загрузке сети

где  $S_{Tp}^{n min}$  – минимальная полная нагрузка трансформатора;  $U_1^{n min}, U_2^{n min} \dots U_n^{n min}$  – напряжение на стороне потребителя, соответствующее режиму минимальных нагрузок в сети (максимально возможное напряжения на рассматриваемом участке).

На рис. 2 изображена модель распределительной сети, аналогичная представленной на рис. 1. Однако разница заключается в режиме работы: во втором случае (рис. 2) линия загружена на некоторую  $i$ -ю мощность ( $S_{Tp}^{ni}$ ), отличную от минимальной.

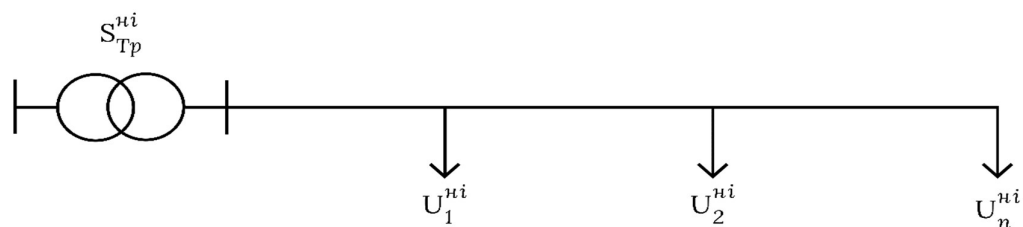


Рис. 2. Уровни напряжений у потребителей при некоторой  $i$ -й загрузке сети:

где  $S_{Tp}^{ni}$  –  $i$ -я полная нагрузка трансформатора;  $U_1^{ni}, U_2^{ni} \dots U_n^{ni}$  – напряжение на стороне потребителя, соответствующее режиму с  $i$ -й нагрузкой в сети.

Для изложения принципов исполнения механизма дорасчета и определения нагрузки в узлах при использовании авторской системы динамического управления нагрузкой рассмотрим режим минимальной нагрузки на некотором участке сети, изображенном на рис. 1.

$$U_1^{H \min} = U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{ЛТ}}^{\min}, \quad (1)$$

где  $\Delta U_{\text{ЛТ}}^{\min}$  – суммарное минимальное падение напряжения в линии и трансформаторе до потребителя №1, изображенного на рис. 1.

$$\Delta U_{\text{ЛТ}}^{\min} = \Delta U_{\text{Л}}^{\min} + \Delta U_{\text{T}}^{\min}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\text{Л}}^{\min}$  – минимальное падение напряжения в линии до потребителя №1;  $\Delta U_{\text{T}}^{\min}$  – минимальное падение напряжения в трансформаторе.

Падение напряжения в линии  $\Delta U_{\text{Л}}^{\min}$  до потребителя будет изменяться в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta U_{\text{Л}}^{\min} = \frac{P_{\min} r_1 + Q_{\min} x_1}{U_{\text{НЛ}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\min}$  и  $Q_{\min}$  – минимальная активная и реактивная мощность на участке до потребителя №1;  $r_1$  и  $x_1$  – активное и реактивное сопротивление линии до потребителя №1;  $U_{\text{НЛ}}$  – напряжение в начале линии, за стороной трансформатора 0,4 кВ.

Падение напряжения в трансформаторе  $\Delta U_{\text{T}}^{\min}$  будет изменяться в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta U_{\text{T}}^{\min} = \frac{P_{\text{Tр}}^{\min} R_{\text{T}} \cos \varphi + Q_{\text{Tр}}^{\min} X_{\text{T}} \sin \varphi}{U_{\text{ном}}} \quad (4)$$

где  $P_{\text{Tр}}^{\min}$  и  $Q_{\text{Tр}}^{\min}$  – минимальная активная и реактивная мощность на трансформаторе;  $R_{\text{T}}$  и  $X_{\text{T}}$  – активное и реактивное сопротивление трансформатора;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки трансформатора;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети.

Для удобства анализа приведенных выражений, потребуется произвести преобразование выражения 1 с учетом выражений 2–4.

$$U_1^{H \min} = U_{\text{ном}} - \frac{P_{\min} r_1 + Q_{\min} x_1}{U_{\text{НЛ}}} - \frac{P_{\text{Tр}}^{\min} R_{\text{T}} \cos \varphi + Q_{\text{Tр}}^{\min} X_{\text{T}} \sin \varphi}{U_{\text{ном}}} \quad (5)$$

Из выражения 5 можно отметить, что главными составляющими падения напряжения на стороне потребителя являются загруженность сети и протяженность линии электропередач (от трансформатора непосредственно до потребителя). Рассмотрим зависимость падения напряжений от режима работы сети более детально. При  $i$ -й загрузке сети ( $S_{\text{Tр}}^{H i}$ ) выражения 1-5 примут следующий вид:

$$U_1^{H i} = U_1^{H \min} - \Delta U_{\text{ЛТ}}^{H i}, \quad (6)$$

где  $\Delta U_{\text{ЛТ}}^{H i}$  – суммарное падение напряжения в линии и трансформаторе до потребителя №1.

$$\Delta U_{\text{ЛТ}}^{H i} = \Delta U_{\text{Л}}^k + \Delta U_{\text{T}}^j, \quad (7)$$

где  $\Delta U_{Л}^k$  – падение напряжения в линии до потребителя №1;  $\Delta U_T^j$  – падение напряжения в трансформаторе;  $\Delta U_{Л}^k$  – падение напряжения в линии до потребителя будет изменяться в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta U_{Л}^k = \frac{P_k r_1 + Q_k x_1}{U_{НЛ}} \tag{8}$$

где  $P_k$  и  $Q_k$  –  $k$ -я активная и реактивная мощность на участке до потребителя №1;  $r_1$  и  $x_1$  – активное и реактивное сопротивление линии до потребителя 1;  $U_{НЛ}$  – напряжение в начале линии, за стороной трансформатора 0,4кВ;  $\Delta U_T^j$  – падение напряжения в трансформаторе будет изменяться в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta U_T^j = \frac{P_{Tp}^{hi} R_T \cos\varphi + Q_{Tp}^{hi} X_T \sin\varphi}{U_{НОМ}}, \tag{9}$$

где  $P_{Tp}^{hi}$  и  $Q_{Tp}^{hi}$  –  $i$ -я активная и реактивная мощность на трансформаторе;  $R_T$  и  $X_T$  – активное и реактивное сопротивление трансформатора;  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности нагрузки трансформатора;  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжение сети.

Преобразуем выражение 6 с учетом выражений 7-9.

$$U_1^{hi} = U_1^{min} - \frac{P_k r_1 + Q_k x_1}{U_{НЛ}} - \frac{P_{Tp}^{hi} R_T \cos\varphi + Q_{Tp}^{hi} X_T \sin\varphi}{U_{НОМ}}. \tag{10}$$

Преобразуем выражение 10 с учетом выражения 5:

$$U_1^{hi} = U_{НОМ} - \frac{P_{min} r_1 + Q_{min} x_1}{U_{НЛ}} - \frac{P_{Tp}^{min} R_T \cos\varphi + Q_{Tp}^{min} X_T \sin\varphi}{U_{НОМ}} - \frac{P_k r_1 + Q_k x_1}{U_{НЛ}} - \frac{P_{Tp}^{hi} R_T \cos\varphi + Q_{Tp}^{hi} X_T \sin\varphi}{U_{НОМ}}. \tag{11}$$

Таблица 1

Зависимость на стороне потребителя: напряжения от потребляемой мощности

Потребляемая мощность	Падение напряжения
$S_n^{H\ min}$	$U_n^{H\ max}$
$S_n^{H1}$	$U_n^{H1}$
$S_n^{H2}$	$U_n^{H2}$
$S_n^{H3}$	$U_n^{H3}$
$S_n^{Hi}$	$U_n^{Hi}$
$S_n^{H\ max}$	$U_n^{H\ min}$

Из выражения 11 следует, что падение напряжения в электрической сети на стороне потребителя может в значительной степени изменяться за счет изменения потребляемой в сети мощности. Значит, падение напряжения в сети можно принять как индикатор уровня загруженности электрической сети. Для каждого потребителя бытового/промышленного предлагается создать базу данных (табл. 1).

### Выводы

1. Представленный авторский метод расчета нагрузки в сети по сравнению с традиционными методиками расчета аварийных, а также режимов минимальных и максимальных нагрузок, позволяет рассчитывать режим динамически (в реальном времени). На данный момент в энергосистеме Республики Беларусь есть возможность определить текущий режим работы только для сравнительно небольших участков сети посредством систем АСКУЭ. Отметим, что режим, рассчитанный при помощи АСКУЭ, будет обладать некоторой инертностью: чем больше опрашиваемых узлов, тем больше период получения данных от средств АСКУЭ (приборов учета, УСПД), также рост количества опрашиваемых узлов ведет к повышению вероятности, что один из них не выйдет на связь.

2. Текущее поколение систем АСКУЭ, а также их распространенность позволяет реализовать с требуемой дискретностью замер мощностей на стороне 0,4 кВ трансформаторов и уровней напряжений у практически всех потребителей, вне зависимости от их категории: бытовые, промышленные. Результаты измерений выгрузить в базу данных, сформированную в виде таблицы корреляции величин, изображенной в табл. 1. Ввиду чего применение представленного в статье метода позволяет значительно сократить время расчета нагрузок в реальном времени на стороне потребителей (время сбора данных со средств АСКУЭ прямо пропорционально их количеству): для расчета потребляемых мощностей в реальном времени необходим опрос только некоторых заранее определенных узлов системы АСКУЭ (в зависимости от размеров исследуемой сети), при этом данные от узла, который не удалось опросить, можно заменить данными из таблицы корреляции параметров (базы данных): определение нагрузки в узле произвести на основании имеющейся в базе зависимости падения напряжения от нагрузки.

### Библиографический список

1. **Фурсанов, М.И.** Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. - Минск: Белэнергосбережение, 2006. – 207 с.
2. **Фурсанов, М.И.** Динамическое управление нагрузкой энергосистемы / М.И. Фурсанов, П.А. Сазонов // Энергетическая стратегия. 2019. – № 6. – С. 23–25.
3. **Сазонов, П.А.** Привлечение потребителей коммунально-бытового сектора к участию в выравнивании графика электрической нагрузки / П.А. Сазонов, А.А. Дашковский // Энергетическая стратегия. 2020. – № 3. – С. 20–24.
4. **Фурсанов, М.И.** Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь / М.И. Фурсанов, П.А. Сазонов // Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 129–137

M.I. Fursanov<sup>1</sup>, P.A. Sazonov<sup>2</sup>, A.A. Dashkovskiy<sup>3</sup>

## CALCULATION METHOD AND DYNAMIC MONITORING OF LOAD IN THE ELECTRIC NETWORK

Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus<sup>1</sup>

OJSC "Belelectromontazhnaladka"<sup>2</sup>

JLLC "Mobile TeleSystems"<sup>3</sup>

**Abstract:** The article is concerned with the author's method of calculating modes (including formulas, tables) and determining the load at nodes using data from digital metering devices, ASCME and the main criteria: speed of the algorithm, minimum incoming / outgoing network traffic, minimum drop in calculation accuracy with an increase in the number of unknown load variables in electric power systems with an implicit number of unknown variables. The advantages of the proposed method are presented in comparison with classical methods of calculating modes and direct interrogation of technical means of ASCME systems.

**Key words:** calculating modes methods, digital means of control and metering of energy, electrical load, voltage drop, optimization, the mode determination, electrical network, electrical system, software, database formation, mathematical model.

### References

- [1] Fursanov M. I., *Opredeleniye i analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosistem [Determination and analysis of electricity losses in electrical networks of power systems]*. Minsk: Belenergosberezhenie, 2006. (in Russian).
- [2] M.I. Fursanov and P.A. Sazonov, *Dinamicheskoye upravleniye nagruzkoy energosistemy [Dynamic power system load control]*. Energy strategy, no. 6, pp. 23–25, 2019. (in Russian).
- [3] P.A. Sazonov and A.A. Dashkovskiy, *Privlecheniye potrebiteley kommunal'no-bytovogo sektora k uchastiyu v vyrav-nivanii grafika elektricheskoy nagruzki [Involving consumers of the utility sector to participate in the alignment of the electric load schedule]*. Energy strategy, no. 3, pp. 20–24, 2020. (in Russian).
- [4] M.I. Fursanov and P.A. Sazonov, *Spetsializirovannyye mobil'nyye prilozheniya kak sredstvo optimizatsii sistemy energosnabzheniya Respubliki Belarus' [Specialized Mobile Applications as Means of Optimizing the Power Supply System of the Republic of Belarus]*. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. vol. 63, no.2, pp. 129–137, 2020. (in Russian)

**А.Р. Хусайнов, Н.Г. Семенова**

## **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Оренбургский государственный университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности систем электроснабжения железных дорог в Оренбургской области. Приведены описания факторов, влияющих на качество электроэнергии. Описаны перспективные направления для повышения качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения, качество электроэнергии, электрифицированный железнодорожный транспорт.

На сегодняшний день потребление электроэнергии железнодорожным транспортом в Российской Федерации составляет более 3,5 процентов от всего объема генерируемой электрической энергии; основная доля которой (порядка 82 процентов) расходуется на тягу поездов, а оставшаяся часть расходуется на питание прочих потребителей (станции, депо, мастерские, районные потребители).

Железнодорожная сеть России в настоящее время – это 16 направлений железных дорог, более 85,6 тыс. км путей с высоким уровнем электрификации: электрифицировано 43,8 тыс. км [7].

Рассмотрим подробнее характеристики железных дорог Оренбургской области. Общая протяженность железных дорог на территории области составляет – 1655 км, из которых электрифицированы участки: Оренбург – Орск - Карталы и Кинель - Бугуруслан - Абдулино – Уфа), что составляет лишь 37% (или 615 км); электрификация осуществляется по системе переменного тока (25 кВ).

По территории Оренбургской области проходят следующие транзитные ж/д магистрали:

- магистрали, связывающие западные и восточные районы России (по этим железным дорогам осуществляется связь Оренбургской области с Центром, Поволжьем, Уралом, Сибирью);
- магистрали, связывающие Центральную Россию с Узбекистаном, Туркменистаном, Казахстаном, Кыргызстаном, Таджикистаном (государства СНГ).

Железные дороги областного значения строились по мере промышленного освоения территории и имеют разные конструкции и степень износа. Так, железнодорожный участок Шильда - Адамовка - Озерный построен для транспортировки сельскохозяйственного сырья и является узколинейной дорогой. Цель строительства дороги Орск - Светлый, Круторожино - Гай, Новоорск - Энергетик, Разведка - Горный Лён – соединение промышленных предприятий с

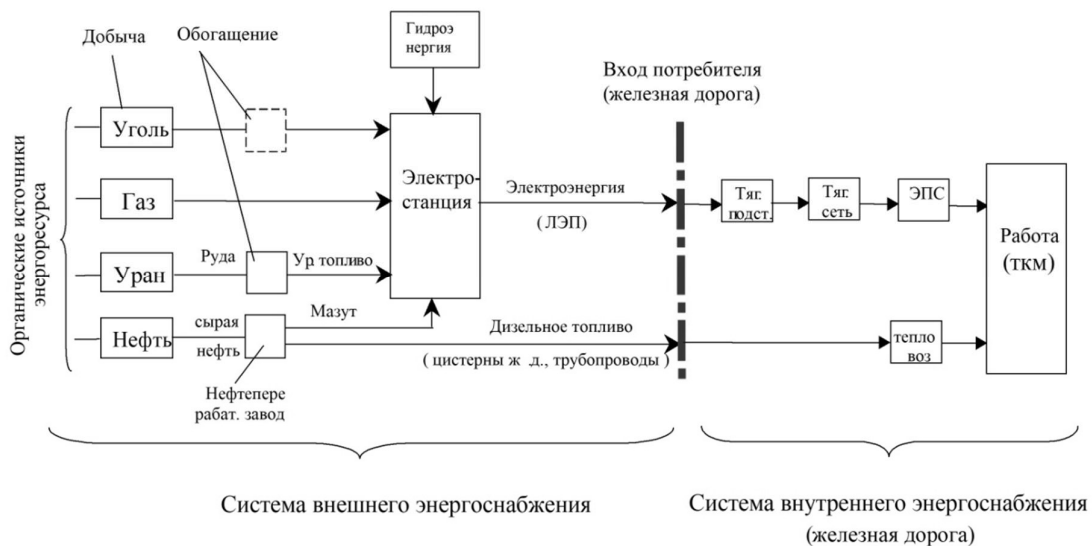


крупными центрами добычи сырья. По плотности железнодорожных путей общего пользования Оренбургская область выходит на средний показатель по Приволжскому федеральному округу (13,3 км/1000 кв. км), что также в 3,4 раза выше среднего показателя по России [3].

Из сказанного следует, что железнодорожный транспорт Оренбургской области имеет большое значение: осуществляет связь центральной части страны с Уралом и Сибирью, транзит товаров в государства СНГ, соединение промышленных предприятий с центрами добычи сырья.

К проблемам областного железнодорожного транспорта относятся недостаточная электрификация, изношенность железнодорожных путей и подвижного состава, необходимость реконструкции системы электроснабжения.

Как известно, в системе энергоснабжения электрифицированных дорог выделяют систему внешнего энергоснабжения и систему внутреннего энергоснабжения (рис. 1).



**Рис. 1. Принципиальная схема энергоснабжения электрифицированной железной дороги**

Основой составляющей системы внешнего энергоснабжения является система электроснабжения, т.к. она должна обеспечивать: бесперебойное движение электропоездов при требуемых параметрах движения; надежное электропитание различных устройств железнодорожного транспорта; электроснабжение всех потребителей нежелезнодорожного транспорта [2].

В систему внешнего электроснабжения входят сети, линии электропередачи, крупные электрические станции, районные трансформаторные подстанции. На электрических станциях вырабатывается электроэнергия, которая затем передается по линиям электропередачи к трансформаторным подстанциям, непосредственно от которых запитаны различного рода потребители (железных дорог, сельского хозяйства, промышленности и т.д.) получают питание.

В составляющую внутреннего электроснабжения (тягового электроснабжения) входят электротяговая сеть и подстанции, устройство которых определяется применяемой системой электрической тяги. Благодаря тяговому электроснабжению электровозы и электропоезда не останавливаются на перегоне, тем самым график движения поездов не нарушается. С этой целью предусмотрено резервирование отдельных элементов системы.

В результате высокого износа и морального устаревания оборудования значительно ухудшается качество электроэнергии, это приводит к снижению скорости движения и перегреву, возникновению бросков тока и буксования, пробоям изоляции электрических машин и другим проблемам.

Основным документом, определяющим мероприятия по повышению качества и надежности электроснабжения электротранспорта в РФ на длительную перспективу, является «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года» [8], одним из основных направлений, изложенных в ней является повышение качества электроэнергии.

Согласно ГОСТ 32144-2013 выделяются девять основных параметров для оценки качества электроэнергии, из них мы выделим три наиболее важных для электрофицированного ж/д транспорта.

1. Отклонение частоты в электрической системе (в сети переменного тока), Гц. Характеризует разность между действительным и номинальным значениями частоты переменного тока в системе электроснабжения и определяется по выражению:

$$\delta f = f - f_{\text{ном}} \quad (1)$$

Допустимые нормы по отклонению частоты составляют:

$$\delta f_{\text{норм}} = \pm 0,2 \text{ Гц}, \quad \delta f_{\text{пред}} = \pm 0,4 \text{ Гц}. \quad (2)$$

Наиболее чувствительны к понижению частоты двигатели собственных нужд электростанций. Снижение частоты приводит к уменьшению их производительности, что сопровождается снижением мощности генераторов и дальнейшим снижением частоты (имеет место лавина частоты).

Перспективным направлением будет являться строительство установок распределенной генерации (РГ) наряду с электростанциями [6], которые могут работать на базе возобновляемых источников энергии параллельно с накопителями электроэнергии (НЭ). При этом НЭ являются важными элементами сетей и позволяют выполнять следующие функции: демпфирование колебаний мощности и частоты; обеспечение стабильной и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников, работающих как автономно, так и в составе ЭЭС; выравнивание графика нагрузки; снижение уровня отклонения напряжения.

В Оренбургской области развивается альтернативная энергетика с использованием солнечной энергии и энергии ветра. Для работы солнечных электростанций в области имеются благоприятные климатические условия. Количество солнечных дней в году в Оренбургской области близко к этому показателю в

городе Симферополь (около 2 200 часов). Введена в эксплуатацию Орская СЭС мощностью 25.00 МВт, строится Соль-Илецкая запланированной мощностью 25.00 МВт, строится ветряная Оренбургская ВЭС запланированной мощностью 75.00 МВт.

2. Отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения текущего значения напряжения  $U$  от номинального значения  $U_{ном}$ :

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} * 100\% . \quad (3)$$

Отклонение напряжения обусловлено изменением потерь напряжения, вызываемых изменением мощностей нагрузок. Отклонение напряжения нормируется на выводах приемников электрической энергии.

Уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава должен быть в диапазоне от 21 кВ до 29 кВ при переменном токе; при постоянном токе от 2,7 кВ до 29 кВ. На отдельных участках с разрешения МПС России допускается уровень напряжения не менее 19 кВ при переменном токе и 2,4 кВ при постоянном токе [9].

Отклонение напряжения приводит к снижению скорости движения и допустимой массы поезда, возникают броски тока, перегрев и пробой изоляции электрических машин и др.

Для уменьшения потерь энергии и повышения коэффициента мощности применяют компенсирующие устройства (КУ), которые могут включаться параллельно (поперечная компенсация) или последовательно (продольная компенсация).

Устройства поперечной компенсации (УПК) [10] и продольной компенсации (УПрК) предназначены для улучшения коэффициента мощности, компенсации потери напряжения, уменьшения несимметрии напряжения, вызванной однофазными тяговыми нагрузками. КУ располагаются на тяговых подстанциях, постах секционирования и защиты и существенно отличаются, например, от защиты линий.

В настоящее время применение УПрК возрастает в связи с увеличением интенсивности движения тяжеловесных поездов при больших тяговых нагрузках. УПрК обладают положительным свойством – они «автоматически» при постоянно изменяющейся нагрузке поддерживают напряжение в контактной сети (КС) путём компенсации индуктивного сопротивления КС своим емкостным сопротивлением, что приводит к уменьшению суммарного сопротивления участка электроснабжения до токоприёмника и, как следствие, к уменьшению потерь напряжения.

3. Несинусоидальность напряжения. Проявляется вследствие возникновения в кривой напряжения, помимо гармоники основной частоты гармоник других высших частот, кратных основной частоте ( $n = 2, 3, 4, \dots$ , и т.д.). Гармоники обычно определяются разложением кривой фактического напряжения в ряд Фурье.

Причиной возникновения несинусоидальности напряжения является наличие потребителей электроэнергии с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Неблагоприятное влияние несинусоидальности состоит в следующем:

- 1) появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях, а также дополнительные отклонения напряжения;
- 2) затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью БК;
- 3) сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов;
- 4) ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики и связи.

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- 1) коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- 2) коэффициентом «-и гармонической составляющей напряжения.
- 3) Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_{и}$ , %, является отношением суммарного действующего значения всех высших гармоник к действующему значению напряжения основной гармоники, причем  $n \geq 2$

$$K_{и} = \frac{\sqrt{\sum U_n^2}}{U_{ном}} * 100\% . \quad (4)$$

Решение проблемы несинусоидальности принципиально возможно при установке на каждой тяговой подстанции пассивных, гибридных и параллельных активных фильтров высших гармоник [11]. Для защиты от гармоник, вызванных наличием в сети нелинейных нагрузок, используются пассивные фильтры, включенные параллельно источнику гармоник, как настроенные на определенную гармонику, так и на гармоники верхних частот. Варианты схем пассивных фильтров:

- настроенные фильтры: с последовательным соединением R-L-C либо с цепочкой R-L-C, включенной последовательно с параллельной цепочкой R-C/L-R;
- фильтры верхних частот: звено R-C (первого порядка) либо звено C-RL или C-RC параллельно с L (второго порядка). Для тиристорных выпрямителей обычно применяются фильтры, настроенные на 3-5-7-11-13-ю гармоники и плюс фильтр верхних частот – на 17-ю гармонику и выше. Добротность фильтров обычно составляет от 20 до 100 %.

Недостатками пассивных фильтров являются значительные капитальные затраты на реактивные элементы, большие требуемые площади. Им свойственно снижение эффективности фильтрации при колебаниях частоты и температуры элементов схемы. Ограничение числа звеньев фильтра вызывает ухудшение фильтрации. Этих недостатков лишены фильтры, активно воздействующие на защищаемый от гармоник участок сети с помощью схем силовой электроники, управляемых маломощной схемой выделения гармоник в точке присоединения (активные фильтры).

## Выводы

1. Основной составляющей системы энергоснабжения железных дорог является система электроснабжения.

2. Обосновано выделение трёх основных показателей качества электроэнергии: отклонение частоты, отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения.

3. Предложены методы повышения КЭ в СЭС ЖД Оренбургской области, а именно: использование установок РГ параллельно с НЭ, применение УПрК, активных фильтров высших гармоник.

#### Библиографический список

1. **Волков, А.А.** Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте: учебник: в трех частях / А.А. Волков, В.А. Кузюков, М.С. Морозов; под ред. Д.В. Шалягина. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. [Электронный ресурс]. — URL: <http://umczdt.ru/books/44/242228> (дата обращения 28.02.2021).
2. **Тер-Оганов, Э.В.** Электроснабжение железных дорог / Э.В. Тер-Оганов, А.А. Пышкин. - Екатеринбург: УрГУПС, 2014г.
3. Е.А. Семёнов, Т.И. Герасименко, Р.Ш. Ахметов «Железнодорожный транспорт Оренбургской области» [Электронный ресурс]. — URL: <http://orenprigoda.ru/экономическая-география/инфраструктура-оренбургской-области/720-железнодорожный-транспорт-оренбургской-области> (дата обращения 28.02.2021).
4. **Закарюкин, В.П.** Управление качеством электроэнергии в системах тягового электроснабжения на основе технологий интеллектуальных сетей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Известия Транссиба. № 3(19). 2014. С. 65–75.
5. **Закарюкин, В.П.** Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов. - Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. 218 С.
6. **Арсентьев, М.О.** Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог с установками распределенной генерации / М.О. Арсентьев, А.В. Крюков, О.В. Арсентьев // Вестник ИргТУ. 2015. № 12(107), С. 170–176.
7. Официальный сайт компании АО «РЖД» [Электронный ресурс]. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9360> (дата обращения 12.03.2021).
8. «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года»: Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № № 877-р. // утверждено распоряжением правительства РФ от 22.11.2008 № 1734-р.
9. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: Приказ Минтранса РФ от 21.12.2010 N 286 (ред. от 25.12.2018)//зарегистрировано в Минюсте России 28.01.2011 N 19627.
10. **Бардушко, В.Д.** Параметрический синтез системы параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях // Электрификация транспорту. — Днепропетровск, 2013. — № 6. — С.8-13
11. **Карташев, И.И.** Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220 – 500 кВ /И.И. Карташев, Р.Р. Насыров, Б.В. Олексюк, М.Г. Симуткин, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Электричество. – М., 2013. – №1. – С. 13-18.

A.R. Khusainov, N.G. Semenova

## ELECTRIC SUPPLY OF RAILWAYS, WAYS TO IMPROVE POWER QUALITY

Orenburg State University

**Abstract:** The article discusses the features of power supply systems for railways in Russia, the Orenburg region. Descriptions of factors affecting the quality of electricity. The promising directions of development for achieving energy efficiency based on the introduction of distributed generation as well as intelligent control systems are described.

**Keywords:** power supply systems, power quality, energy efficiency.

### References

- [1] Avtomatika, telemekhanikaisvyaz' nazheleznodorozhnomtransporte: uchebnik: v trekhchastyakh / A.A. Volkov, V.A. Kuzyukov, M.S. Morozov; pod red. D.V. Shalyagina. - M.: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiytsentrpoobrazovaniyunazheleznodorozhnomtransporte», 2020. [Electronic resource]. - URL: <http://umczdt.ru/books/44/242228> (date of treatment 02.28.2021).
- [2] Ter-OganovE.V., PyshkinA.A.Elektrosnabzheniyezheleznykhdorog. - Yekaterinburg: UrGUPS, 2014g.
- [3] Ye.A. Semonov, T.I. Gerasimenko, R.SH. Akhmetov «ZheleznodorozhnyytransportOrenburgskoyoblasti» [Electronic resource]. - URL: <http://orenpriroda.ru/economic-geography/infrastructure-renburgskaya-region/720-rail-transport-orenburgskaya-region> (date of treatment 02/28/2021).
- [4] Akaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Power quality management in traction power supply systems based on smart grid technologies. IzvestiyaTranssiba.No. 3 (19). 2014.S. 65–75.
- [5] Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelligent power quality management technologies. Irkutsk: Publishing house IRNITU, 2015.218 pp.
- [6] Arsentiev M.O., Kryukov A.V., Arsenyev O.V. Indicators of the quality of electricity in power supply systems of railways with distributed generation units // Bulletin of ISTU. 2015. No. 12 (107), pp. 170–176.
- [7] Official website of the company JSC "Russian Railways" [Electronic resource]. - URL: <https://company.rzd.ru/ru/9360> (date of treatment 03/12/2021).
- [8] "On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030": Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r. // approved by the order of the government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-r
- [9] Order of the Ministry of Transport of Russia of December 21, 2010 N 286 (as amended on December 25, 2018) On approval of the Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation (Registered in the Ministry of Justice of Russia on January 28, 2011 N 19627)
- [10] Bardushko, V.D. Parametric synthesis of a system of parallel capacitive compensating devices in a traction network in modern conditions / V.D. Bardushko // Electricity transport. - Dnepropetrovsk, 2013. - No. 6. - P.8-13
- [11] Kartashev, I.I. Investigation of the influence of sources of higher harmonics on quality of electricity in electric power systems 220 - 500 kV / I.I. Kartashev, R.R. Nasyrov, B.V. Oleksyuk, M.G. Simutkin, V.N. Tula, R.G. Shamonov // Electricity. - M., 2013. - No. 1. - S. 13-18.

---

---

**Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

---

УДК 620.92

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_299

**Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Исса Х. А., Б.А Якимович.****МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ  
ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ, СВЯЗАННОЙ С СЕТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ  
(СГПМ)**

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, РФ

**Аннотация:** Энергия ветра считается одной из проверенных технологий. Благодаря конкурентоспособным затратам на производство электроэнергии, система преобразования энергии ветра (СПЭВ) в настоящее время используется для удовлетворения как нагрузок, связанных с сетью, так и автономных нагрузок.

Целью данной статьи является полное моделирование и симуляция автономного управления ветряной турбиной, приводимой в действие синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ), который подает энергию переменного тока в энергосистему общего пользования. Для обеспечения автономного управления используются два инвертора источника напряжения для управления ветряной турбиной, подключенной к сети. Инвертор на стороне генератора используется для настройки синхронного генератора, а также для отделения генератора от сети, когда это необходимо. Инвертор на стороне сети управляет потоком мощности между шиной постоянного тока и стороной переменного тока. Оба они ориентированы на управление пространственно-векторным ШИМ с задним частотным преобразователем. Кроме того, ПИ-регулятор используется для управления углом наклона ветряной турбины. Полная автономная система моделируется и моделируется в среде Matlab Simulink 2019a.

**Ключевые слова:** идентификация, управление, ветротурбина, энергия ветра, система преобразования энергии ветра (СПЭВ).

Система преобразования энергии ветра (СПЭВ) является одним из наиболее универсальных нетрадиционных источников энергии из-за постоянно растущего спроса на электроэнергию. Поскольку ветер является естественным источником, а его полезность основана на климатических изменениях, важно эффективно использовать эту энергию для удовлетворения спроса [1]. Благодаря развитию технологий в синхронных и асинхронных генераторах, можно эффективно использовать эти генераторы в СПЭВ. Энергия ветра может быть использована для автономной нагрузки или подключена к сети.

В настоящее время многие автономные нагрузки питаются от возобновляемой энергии [2-4]. Ввиду этого интереса к использованию ветроэнергетических технологий для автономного применения проводится большое количество исследований по выбору подходящего генератора для автономного СПЭВ [5].

На рис. 1 показана система ветряных турбин, состоящая из ступицы, системы зубчатой передачи, тормоза, генератора, лопасти, гондолы и высокоскоростного вала [6].

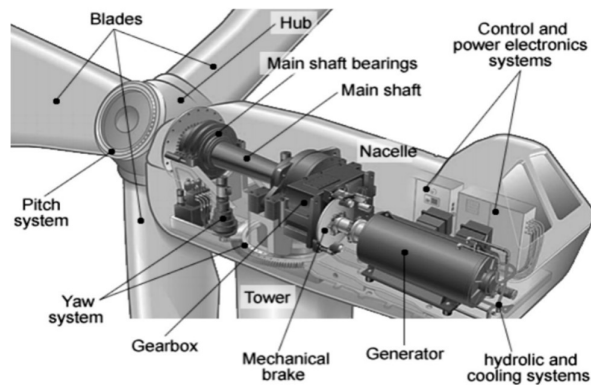


Рис. 1. Система ветровых турбин.

Для оптимизации использования энергии ветра в автономной или подключенной к сети системе необходимо разработать правильную стратегию управления и схему мониторинга энергии [7]. Поскольку энергия ветра является прерывистой, для эффективного использования энергии ветра может использоваться гибридная система, такая как система ветряных батарей [8-10].

### Ветрогенераторная система СГПМ

Ветрогенерирующая система СГПМ показана на рис.2, где ветротурбина соединена с СГПМ. Электроэнергия, вырабатываемая СГПМ, передается в энергосистему с помощью выпрямителя, повышающего преобразователя и инвертора.

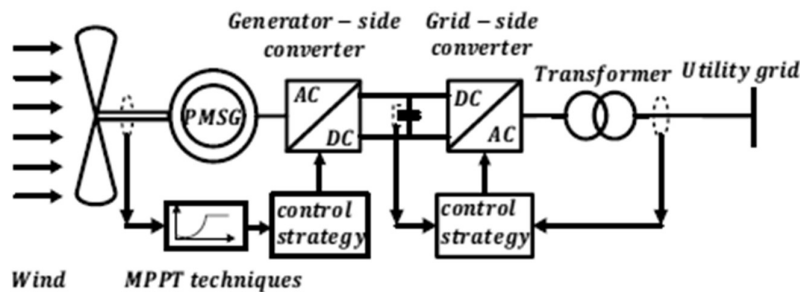


Рис.2. СГПМ Система ветровых турбин

#### А. Модель ветра

Модели ветра описывают колебания скорости ветра, которые влияют на качество электроэнергии и характеристики управления ветровой электростанцией. Таким образом, модель скорости ветра имитирует колебания скорости ветра, которые влияют на колебания мощности ветряных турбин [11]. Ветер, действующий на плоскость ротора ветротурбины, является очень сложным и включает как



детерминированные эффекты (средний ветер, тень от башни), так и стохастические вариации из-за турбулентности [12].

### В. Аэродинамическая модель

Ветровая турбина, по сути, представляет собой машину, которая преобразует кинетическую энергию движущегося воздуха (ветра) в механическую энергию на валу турбины и, наконец, в электрическую энергию [13]. Взаимодействие турбины с ветром является сложным, но достаточно простое представление возможно путем моделирования аэродинамического крутящего момента или аэродинамической мощности, как описано далее. Сила ветра создает аэродинамические силы подъема и сопротивления на лопасти ротора, которые, в свою очередь, создают крутящий момент на роторе ветряного двигателя. [14].

Аэродинамический крутящий момент определяется как:

$$T_r = \frac{P_{aero}}{W_{rotor}}, \quad (1)$$

где  $P_{aero}$  - аэродинамическая мощность, развиваемая на главном валу ветротурбины с радиусом  $R$  при скорости ветра  $v_{eq}$  и плотности воздуха  $\rho$  [15]. Это выражается

$$P_{aero} = 0,5 * \rho \pi R^2 v_{eq}^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch}), \quad (2)$$

$W_{rot} = (\lambda) \times (V_{eq} / R)$  - скорость вращения ротора [17].

$$T_r = \frac{P_{aero}}{W_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2}(\rho \pi R^2 (v_{eq})^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch}))}{(\lambda) \left(\frac{v_{eq}}{R}\right)}. \quad (3)$$

Плотность воздуха  $\rho$  зависит от температуры и давления воздуха. Безразмерный коэффициент мощности  $C_p(\lambda, \theta_{pitch})$  представляет эффективность ротора турбины [16]. Этот коэффициент зависит от отношения скорости наконечника, выраженного как  $\lambda = W_{rotor} \frac{R}{v_{eq}}$ , и угла лезвия  $\theta_{pitch}$ .  $W_{rot}$  обозначает скорость ротора. Для турбины с постоянной скоростью коэффициент мощности уменьшается, когда скорость ветра  $v_{eq}$  увеличивается ( $\lambda$  мала). Этот факт используется в пассивной ветровой турбине [17].

Коэффициент эффективности ( $C_p$ ) изменяется при разных отрицательных значениях угла тангажа ( $0^0, -1^0, -2^0, -3^0$ ), но наилучшая эффективность достигается при  $\theta_{pitch} = 0^0$ .

## Управление ветровой турбиной с СГПМ

### 1. Управление углом тангажа

Система аэродинамического контроля играет важную роль в регулировании механической мощности. Контроллер угла наклона основан на принципе, который изменяет угол лопастей при оборотах выше максимальной скорости генератора, а также защищает генератор от перегрузки при высоких скоростях ветра. Оптимальный угол для скорости ветра ниже номинальной примерно равен нулю, а затем он увеличивается с увеличением скорости ветра. Это оказывает

значительное влияние на коэффициент полезного действия и значение крутящего момента турбины в [18]. На рис. 3 представлена модель контроллера угла наклона в Matlab Simulink 2019a.

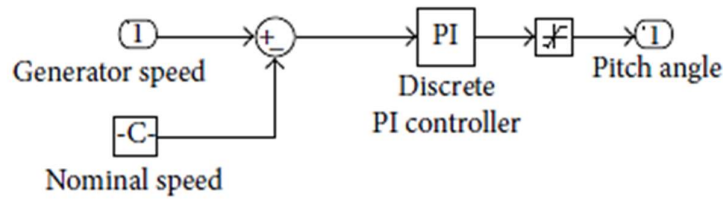


Рис 3. Модель регулятора угла тангажа в Matlab simulink 2019a

В этом контроллере скорость генератора, который является входом, сравнивается с его эталонным значением через ПИ-регулятор, чтобы получить выходное значение угла наклона лопаток, которое изменяет коэффициент полезного действия турбины.

## 2. Метод Наблюдателя

Из метода теоретического наблюдателя для использования линейного инвариантного по времени уравнения состояния (4) мы определяем линейного наблюдателя состояния также как  $n$ -мерное линейное уравнение состояния, которое принимает  $u(t)$  и  $y(t)$  в качестве входных данных и состояние которого представляет оценку  $\hat{x}(t)$ . Наблюдатель принимает вид уравнения (5) [19].

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad X(0) = X_0 \quad (4)$$

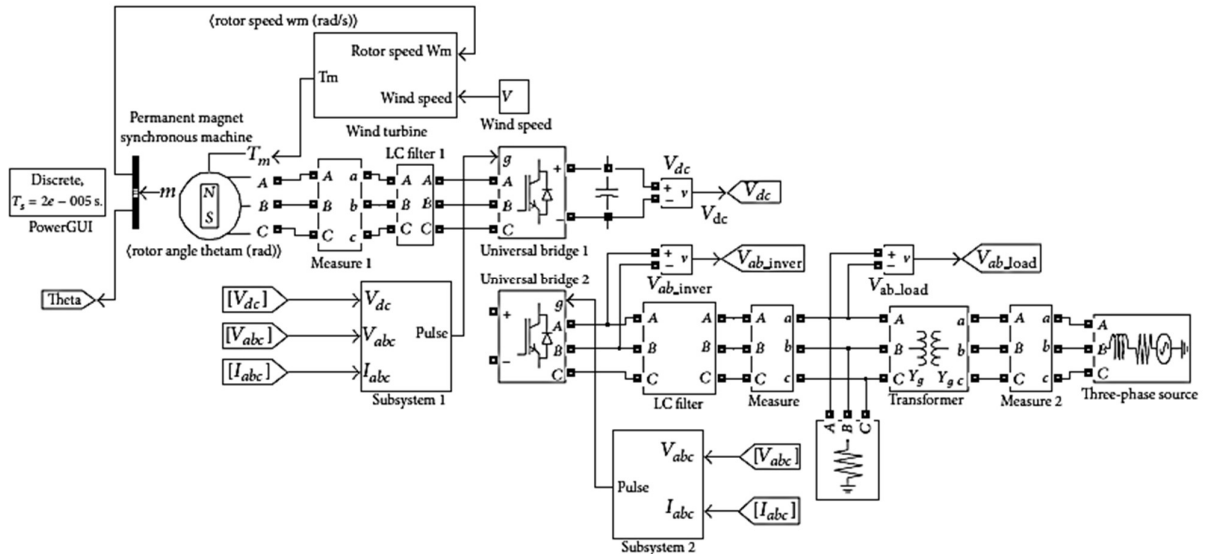
$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y} &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \right\} \quad \hat{X}(0) = \hat{X}_0 \quad (5)$$

Уравнение выглядит как копия уравнения состояния (4), управляемого членом ошибки  $y(t) - \hat{y}(t)$ , который входит в динамику через матрицу усиления наблюдателя  $n \times r : L$ . Этот член ошибки предназначен для приведения оценки состояния к фактическому состоянию  $x(t)$  с течением времени. Мы определяем погрешность оценки  $\hat{x}(t) = y(t) - \hat{x}(t)$ , в терминах которой получаем динамику погрешности [19].

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= y(t) - \hat{x}(t) = Ax(t) - A\hat{x}(t) - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] \\ &= (A - LC) \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

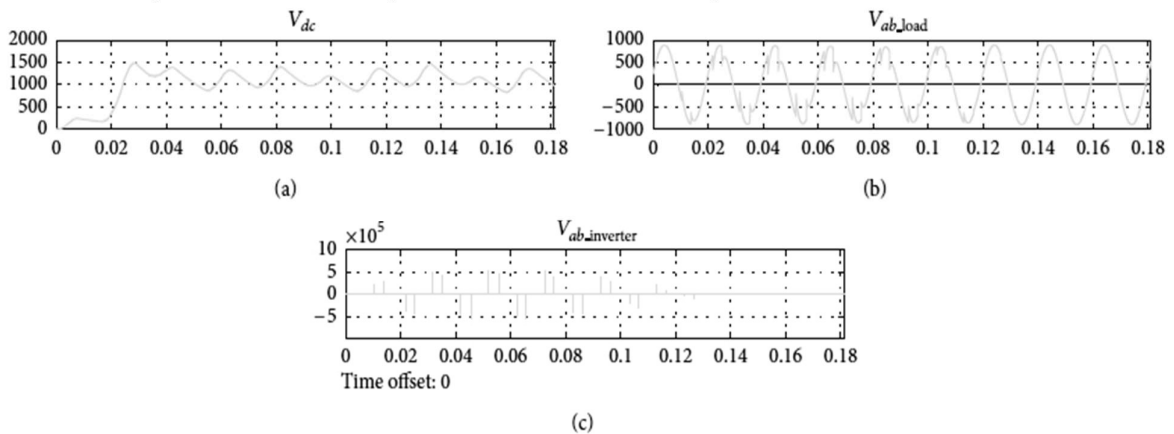
## Анализ моделирования и результаты

Чтобы проверить модель всего проекта автономной системы управления, MATLAB 2019a используется для моделирования на рис. 4.



**Рис.4. Имитационная модель автономного управления ветроэнергетической установкой СГПМ**

Модель ветротурбины находится в ветротурбине, модель системы управления инвертором на стороне генератора и инвертором на стороне сети включены в подсистему 1 и подсистему 2. Регулятор угла тангажа также моделируется в ветротурбине. В этом моделировании модель СГПМ ветротурбины получает скорость ветра и обеспечивает оптимальную опорную скорость для управления системой. Результаты моделирования показаны на рис. 5-7.



**Рис.5. Напряжение промежуточного контура, напряжение нагрузки и напряжение инвертора**

На рис. 5 показаны волны напряжения промежуточного контура, напряжения, создаваемого инвертором на стороне сети, и напряжения фазы А, подаваемого в сеть. По результатам признано, что постоянное напряжение хорошо контролируется для стабилизации характеристик.

На рис.6 показаны волны трехфазного напряжения и тока сети при работе автономной ветряной турбины СГПМ в стабильном состоянии. Фаза напряжения почти противоположна фазе тока.

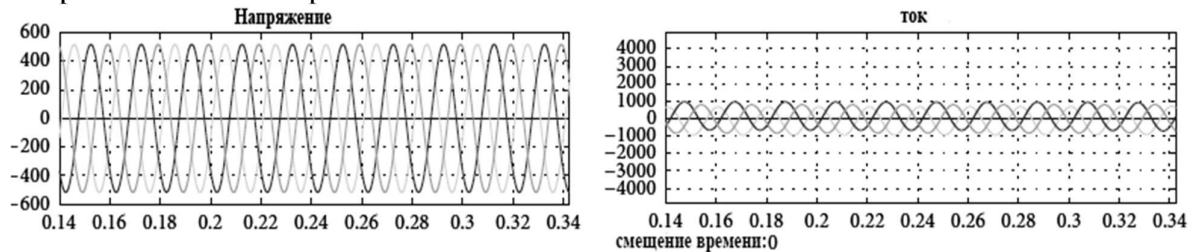


Рис.6. Трехфазное напряжение и ток сети

На рис.7 выполняется управление развязкой сигналов активной и реактивной мощности. Когда ветряная турбина улавливает скорость ветра со скоростью 4,1 м/с, СГПМ начинает работать. Таким образом, угол тангажа регулируется таким образом, чтобы уловить максимальный коэффициент при скорости ветра 13 м/с. Через 0,16 с инвертор на стороне генератора и инвертор на стороне сети взаимодействуют для управления напряжением через контроллеры. Ветровая турбина получает стабильную выходную мощность в сеть с стандартным напряжением, частотой и фазой. Благодаря автономному управлению, включая контроллер угла наклона, инвертор на стороне генератора и инвертор на стороне сети, ветряная турбина может достигать наивысшего КПД.

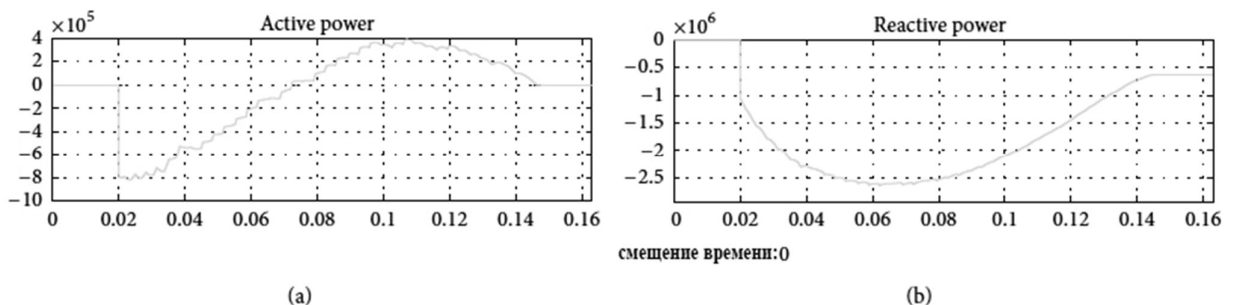


Рис.7. Активная и реактивная мощность

## Выводы

В этой статье анализируются стратегии управления, а также моделируются конструкции и моделируется вся автономная система ветряной турбины СГПМ, подающей переменный ток в энергосистему в Matlab Simulink 2019a. Результаты моделирования показывают, что комбинация контроллера угла наклона, контроллера инвертора на стороне генератора и контроллера инвертора на стороне сети имеет хорошие динамические и статические характеристики. Можно отслеживать максимальную мощность, и ветряная турбина генератора может работать с высоким КПД. Напряжение промежуточного контура поддерживается на стабильном уровне для разделения управляющей активной и реактивной мощности. Следовательно, на выходе будет оптимальное энергоснабжение сети.

**Библиографические ссылки**

1. **Абдали, Л.М.** Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветро-электрических установок /Л.М. Абдали, Ф.М. Аль-Руфай, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С.102–112. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112
2. **Абд Али Мохаммед** Лаит Разработка элементов Smart Grid для оптимизации режимов районных сетей / Мохаммед Абд Али Лаит, Исса Хайдер Абдулсахиб // Молодой ученый. 2014. № 8. С. 117–120.
3. Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Kakushina E.G. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 223-228. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040054>.
4. Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 229-234. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1904008X>.
5. Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>.
6. Guryev V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 242-246. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040042>.
7. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H., Abd Ali L.M. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell). *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. [doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418).
8. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohammed and HusamAbdulahseinWahhab. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. [doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673](https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673).
9. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.
10. Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A.. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 313 - 320. Doi :10.5937/jaes18-24460.
11. Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
12. Кувшинов, В., Абдали, Л., Морозова, Н., Крит, Б., Аль-Руфай, Ф., & Исса, Х. (2021). Экспериментальные исследования приемных поверхностей плоских солнечных коллекторов. *Электронная обработка материалов*, 57(1), 75-81. DOI: 10.5281/zenodo.4456690
13. Abd Ali L.M., Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 3698-3706. DOI: 10.36478/jeasci.2019.3698.3706
14. **Абдали, Л. М.** Моделирование и контроль энергии ветра, X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов" / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Х.А. Исса, Х.Д. Мохаммед, Б.А. Якимович. - Томск: ТПУ, 22–24 апреля 2020 г., с. 14-19.
15. **Абдали, Л.М.** Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии / Л.М. Абдали, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров, Ф.М. Аль-Руфай // *Строительство и техногенная безопасность*. — 2020. — № 18(70). — с.133-142. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-18-133-142.

16. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali L.M., Al Bairmani A.G., Ghachim M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using TMMT Algorithm. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 96-101. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-96-101
17. Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фото-вольтаики / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 100–108. doi: 10.22213/2413-1172-2020-2-100-108.
18. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Мохаммед Х. Д., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Моделирование гибридной фото-ветроэнергетической системы с сетевым подключением. В сборнике: Возобновляемые источники энергии. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы, 2020, С. 117-128.
19. Мохаммед, Х. Д., Абдали, Л. М., Исса, Х. А., Аль-Руфай, Ф. М., Разработка обобщенной фотоэлектрической Модель с MATLAB использованием, X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов", Томск: ТПУ, 22-24 апреля 2020,с.166-172.

L. M. Abdali, F. M. Al-Rufae H.A Issa, B. A. Yakimovich

## MODELING AND CONTROLLING A GRID-CONNECTED WIND ENERGY SYSTEM USING A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG)

Sevastopol State University

**Abstract.** Wind power is considered one of the proven technologies. Due to the competitive costs of generating electricity, the Wind Energy Conversion System (WECS) is currently used to meet both grid-related and stand-alone loads.

The goal of this work is to develop and simulate a wind turbine-driven permanent magnet synchronous generator (PMSG) that supplies ac electricity to the utility grid with total autonomy. Two voltage source inverters are used to control wind turbines connected to the grid in order to provide good autonomous control. The generator-side inverter is used to modify the synchronous generator and, when necessary, disconnect it from the grid. The grid-side inverter regulates the power flow between the DC bus and the AC side. Space vector PWM and a back-to-back frequency converter are used to regulate both. In addition, the controller PI is employed to manage the wind turbine's pitch angle. In the Matlab Simulink 2019a environment, the entire autonomous system is modeled and simulated.

**Keywords:** Identification, control, wind turbine, wind power, wind power conversion system (WECS).

### References

- [1] Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Smart Control System for the Wind Energy Networks // Vestnik IzGTU imeni M.T. Kalasnikova. - 2021. - Vol. 24. - N. 1 - P. 102-112. doi: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112
- [2] Abd Ali Laith Mokhammed, KhayderAbdulsakhilIssa. [Development of Smart Grid elements for optimizing regional network modes]. Molodoyuchenyy, 2014, vol. 8, pp. 117-120 (in Russ.).
- [3] Kuvshinov V.V., Abd Ali L.M., Kakushina E.G. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 223-228. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040054>.
- [4] Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 229-234. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1904008X>.
- [5] Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>.
- [6] Guryev V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 242-246. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040042>.
- [7] Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H., Abd Ali L.M. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell). J. Eng. Appl. Sci., 2019, no. 14, pp. 4414-4418. doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418.
- [8] Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohammed and HusamAbdulhuseinWahhab. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673.

- [9] Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.
- [10] Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 313 - 320. doi :10.5937/jaes18-24460.
- [11] Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
- [12] Kuvshinov, V. V., Morozova, N. V., Abd Ali, L. M., Krit, B. L., Al-Rufae, F. M., & Issa, H. A. (2021). Experimental studies for the receiving surfaces of solar flat collectors. *Электронная обработка материалов*, 1(57), 75–81. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4456690>
- [13] Abd Ali L.M., Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 3698-3706. doi.org/10.3923/jeasci.2019.3698.3706.
- [14] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Issa Kh.A., Mohammed Kh.D., Yakimovich B.A., [Modeling and control of wind energy], X Vserossiyskayanauchno-prakticheskayakonferentsiya "Nauchnayainitsiativainostrannykhstudentov i aspirantovrossiyskikhvuzov", - Tomsk: TPU, April 22-24, 2020, p. 14-19(in Russ.).
- [15] Abdali L.M. Development of the simulation and control system for an integrated solar energy generation and storage / L.M. Abdali, V.V..Kuvshinov, E.A. Bekirov, F.M. Al-Rufae // *Construction and industrial safety*. — 2020. — № 18(70). — p.133-142. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-18-133-142.
- [16] Fazal, M.R.; Kamran, M.; ul Haq, I.; Abbas, Z.; Ayyaz, M.N.; Mudassar, M. Modified Perturb and Observe TMMT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2019, 9, 721-731.
- [17] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Optimization of Energy Storage in Hybrid Wind and Photovoltaic Energy Systems]. *VestnikIzhGTUimeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 100-108 (in Russ.). DOI:10.22213/2413-1172-2020-2-100-108.
- [18] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Mohammed H.D., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Modeling of a hybrid photo-wind power system with a mains connection V sbornike: *Vozobnovlyayemyye istochniki energii. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem i XII nauchnoy molodezhnoy shkoly*, 2020, S. 117-128. (in Russ.).
- [19] Mohammed, H. D., Abdali, L. M., Issa, H. A., Al-Rufai, F. M., Development of a Generalized Photoelectric Model with MATLAB.X Vserossiyskayanauchno-prakticheskayakonferentsiya "Nauchnayainitsiativainostrannykhstudentov i aspirantovrossiyskikhvuzov", - Tomsk: TPU, April 22-24, 2020, pp. 166-172 (in Russ.)



Али К.А.<sup>1</sup>, Абдали Л. М.<sup>2</sup>, Мохаммед Х.Д.<sup>1</sup>, Исса Х.А.<sup>2</sup>, Н.В. Коровкин

## АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого<sup>1</sup>  
Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, РФ<sup>2</sup>

**Аннотация:** Использование возобновляемых источников энергии и, в частности, солнечной энергии привлекло значительное внимание в последние десятилетия. Проекты по производству фотоэлектрической (PV) энергии реализуются в очень большом количестве во многих странах. Многие исследовательские работы проводятся для анализа и проверки производительности фотоэлектрических модулей. Реализация экспериментальной установки для фотоэлектрической энергосистемы с преобразователем постоянного тока для проверки производительности системы не всегда возможна из-за практических ограничений. Программная имитационная модель помогает анализировать производительность фотоэлектрических модулей, и более полезной будет общая схемная модель, которую можно использовать для проверки любого коммерческого фотоэлектрического модуля.

В данной статье представлено моделирование математической модели фотоэлектрического модуля, повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный и нагрузки. Модель, представленная в этой статье, может использоваться как обобщенный фотоэлектрический модуль для анализа производительности любых коммерчески доступных фотоэлектрических модулей.

**Ключевые слова:** автономная фотоэлектрическая система, Matlab/Simulink, фотоэлектрические панели, батарея, контроллер, нагрузка, производительность, температура.

Фотоэлектрические энергетические системы играют все более важную роль в современной структуре электроэнергетики из-за продолжающегося сокращения традиционных источников энергии в мире [1]. Основные преимущества фотоэлектрических систем: они не имеют движущихся частей, не производят шума, не требуют или почти не требуют обслуживания, не загрязняют окружающую среду, являются возобновляемыми, имеют модульную структуру и высокую надежность [2-4].

Автономная фотоэлектрическая система питания представляет собой полный набор взаимосвязанных компонентов для преобразования солнечного излучения непосредственно в электричество и обычно состоит из фотоэлектрического генератора, батареи, контроллера заряда, инвертора и нагрузки системы. Автономные системы - это фотоэлектрические электростанции, которые не подключены к централизованной электрической сети [5].

Однако, чтобы понять работу фотоэлектрической системы и оценить ее производительность в зависимости от климатических условий, необходимо представить ее математической моделью на основе фотоэлектрического элемента. На рис. 1 показана функциональная схема фотоэлектрической системы [6].

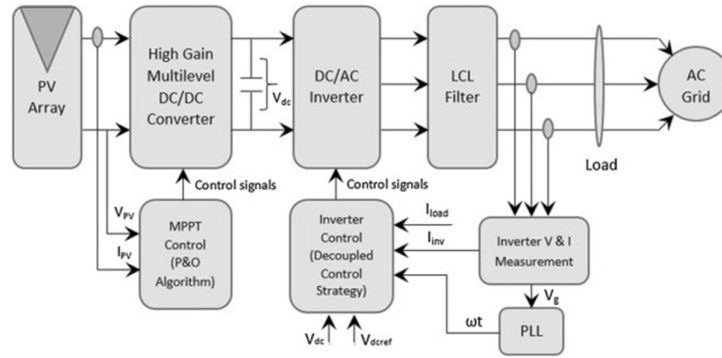


Рис.1 Структурная схема автономной фотоэлектрической системы

Модель может теоретически моделировать поведение фотоэлектрической системы в отношении определенных параметров, таких как солнечный свет, температура и сопротивление. Исследователи разработали различные модели фотоэлектрических систем. Среди них модель с одним диодом - самая простая, это хороший компромисс между простотой и точностью, наиболее широко использующийся: [7-9] как с последовательными, так и с параллельными резисторами, чтобы показать влияние освещенности и температуры на фотоэлектрический модуль [10]; чтобы обеспечить взаимодействие с преобразователем мощности, чтобы найти наилучшие уравнения тока (I), напряжения (V) для модели с одним фотоэлектрическим элементом и влияния последовательного и параллельного сопротивления [11].

Прямой расчет управляется математической моделью с использованием такого программного обеспечения, как Matlab Simulink [12,13]. Оценивают простой аналитический метод извлечения параметров, входящих в уравнение поведения фотоэлектрического модуля, представляют математическую модель фотоэлектрического элемента (PV) с использованием среды Matlab/simulink для нахождения параметров нелинейного уравнения, связывающего ток (I) с уравнением напряжения (V) [14]. Используется простой и успешный метод для оценки последовательного сопротивления, коэффициента идеальности, тока насыщения и шунтирующей проводимости в освещенных солнечных элементах; этот подход включает в себя вспомогательную функцию и компьютерную настройку [15-17].

### Моделирование солнечных фотоэлементов и массивов

Имитационная модель солнечной фотоэлектрической (PV) ячейки построена на основе математической модели. Математическое выражение тока нагрузки можно получить из эквивалентной схемы солнечного фотоэлемента. Эквивалентная схема солнечного фотоэлемента представлена на рис. 2 [18].

Уравнение тока нагрузки:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(V + IR_S)}{NKT} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}, \quad (1)$$

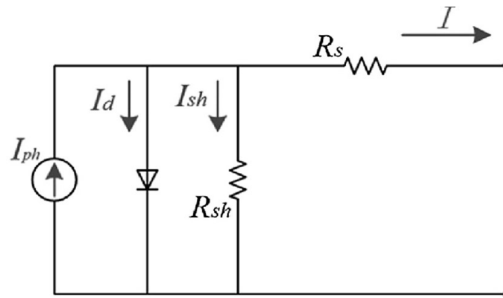


Рис.2 Эквивалентная электрическая схема фотоэлектрической модели.

где  $I$  - ток нагрузки,  $I_{ph}$  - фототок;  $I_s$  - ток насыщения диода;  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  - заряд электрона;  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж / К}$  - постоянная Больцмана;  $V$  - напряжение на клеммах элемента;  $T$  - температура элемента в Кельвинах;  $N$  - идеальный фактор диода;  $R_{sh}$  является шунтирующим сопротивлением, и  $R_s$  является последовательным сопротивлением [19].

Для разработки имитационной модели солнечный фотоэлектрический модуль был рассмотрен как стандартный модуль BP MSX60 [19]. В следующей таблице показаны необходимые ключевые характеристики фотоэлектрического модуля при стандартных условиях тестирования:

**BP MSX60 pv модуль электрические характеристики**

параметр	Значение
Ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ )	3.8A
Напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ )	21.1V
Максимальный ток питания ( $I_{mp}$ )	3.5A
Максимальное напряжение питания ( $V_{mp}$ )	17.1V
Число последовательно соединенных ячеек $N_s$	36
Температурный коэффициент для $I_{sc}$ , $K_I$	$(0.065 \pm 0.015) \% / ^\circ\text{C}$
Температурный коэффициент для $V_{oc}$ , $K_V$	$-(80 \pm 10) \text{mV} / ^\circ\text{C}$

**Моделирование и результаты**

Система на рис. 1 смоделирована с точки зрения управления, показанной на рис. 3. при изменении температуры или излучения создается новая точка максимальной мощности. Системе необходимо перейти к этой новой установке. ТММ выполняет задачу отслеживания вместе с контроллером PI. Требуемое значение коэффициента заполнения затем подается на устройство, которое

запускает затвор полевого МОП-транзистора в понижающем преобразователе. Реализация всей системы в Matlab/Simulink показана на рис. 4.

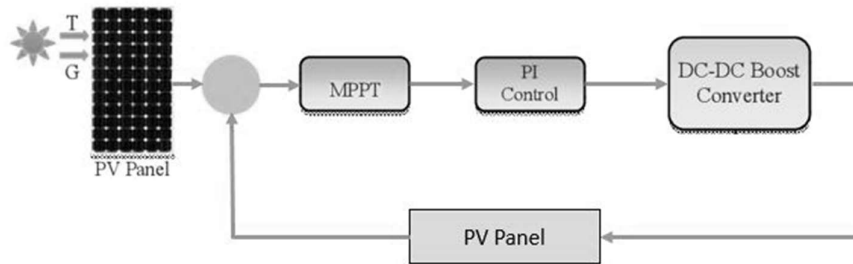


Рис 3. Автономная фотоэлектрическая система

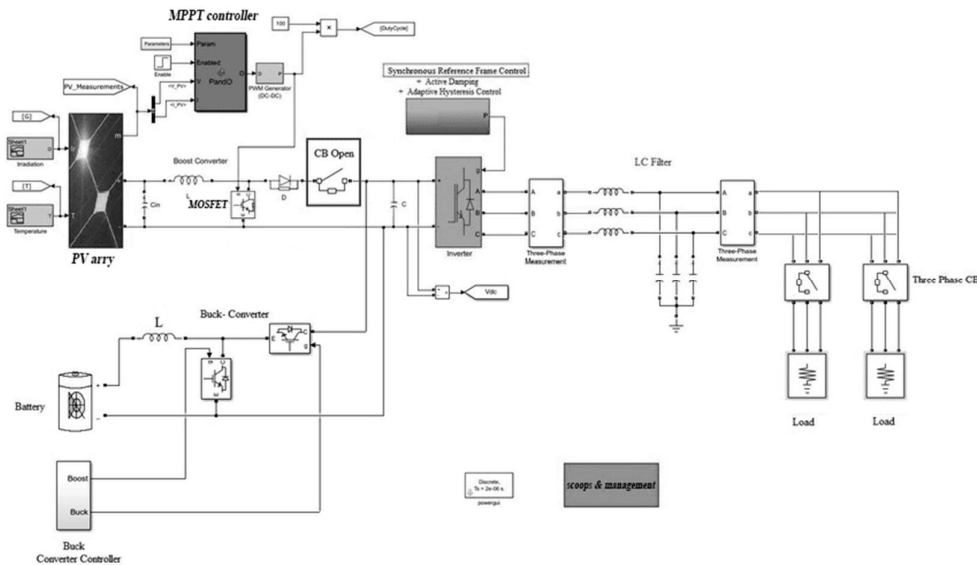


Рис 4. Реализация Simulink автономной фотоэлектрической системы

Ток фотоэлектрического модуля подается на нагрузку через индуктор. Когда переключатель MOSFET находится в положении ON, ток фотоэлектрического модуля протекает через индуктивность. Это увеличивает напряжение на конденсаторе. Когда переключатель MOSFET находится в положении ВЫКЛ, ток принудительно протекает через катушку индуктивности и диод, и напряжение на конденсаторе уменьшается. Излучение и температура меняются и используются для проверки работы системы. В моделировании используются четыре различных погодных условия. Эти наборы: ( $550 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ( $600 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ( $1200 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и ( $1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Максимальная мощность, мощность фотоэлектрического модуля и выходная мощность показаны на рисунке 5. Ясно, что система достигает максимальной мощности. Разница между выходной мощностью и мощностью фотоэлектрического модуля связана с потерями в преобразователе.

Было смоделировано множество сценариев для оценки производительности системы. Сценарий I: ( $220 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ( $600 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ( $800 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и ( $600 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Из рис. 6 видно, что система отслеживает максимальную мощность даже на этих низких уровнях. Сценарий II: ( $550 \text{ Вт} / \text{м}^2$  и  $25$

С), (600 Вт / м<sup>2</sup> и 35 С), (1200 Вт / м<sup>2</sup> и 45 С) и (1000 Вт / м<sup>2</sup> и 55 С) для имитации погоды в пустыне Ирак. На рис. 7 показана соответствующая выходная мощность.

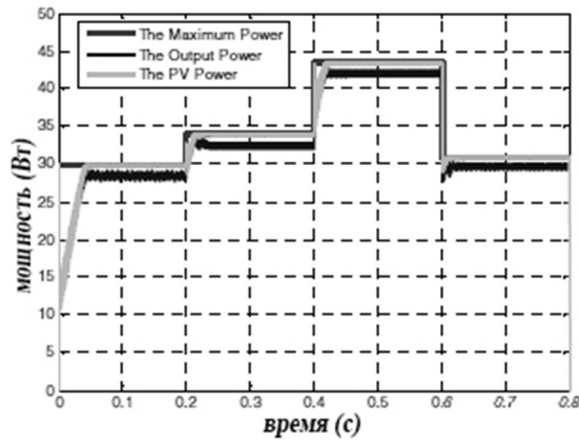


Рис.5. Мощность фотоэлектрического модуля, высота-мощность и мощность выхода

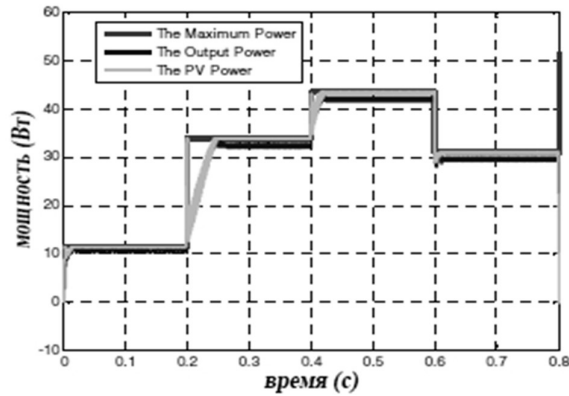


Рис.6. Мощность фотоэлектрического модуля, максимальная мощность и выходная мощность

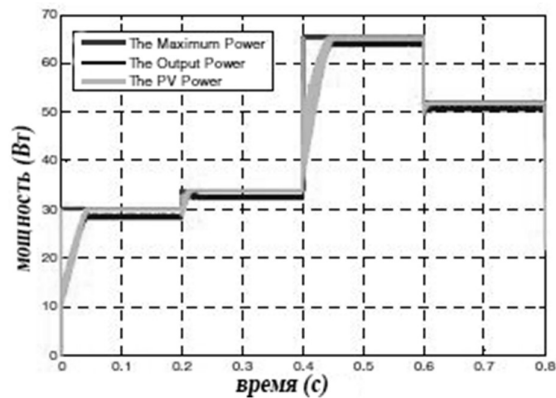


Рис.7. Мощность фотоэлектрического модуля, максимальная мощность и выходная мощность.

## Заключение

Основываясь на подходе Matlab/Simulink, мы получили, что общая производительность автономных фотоэлектрических систем зависит от уровня солнечного излучения и от состояния заряда батареи. Результаты также показывают, что нагрузка на потребителей покрывается независимо от уровня солнечного излучения для двух типов дней и весенне-осенних условий. Системная модель фотоэлектрических модулей на основе схем помогает анализировать производительность коммерческих фотоэлектрических модулей. Общая модель фотоэлектрического модуля разработана с использованием часто используемых блоков в виде замаскированного блока подсистемы. Результаты, полученные в результате моделирования, показывают отличное совпадение с графиками характеристик, приведенными в технических данных выбранных моделей. Таким образом, модель может быть использована для анализа производительности любого коммерческого фотоэлектрического модуля. Результаты показывают близкое соответствие между выходом преобразователя с постоянным входом постоянного тока и преобразователем с фотоэлектрическим питанием.

## Библиографические ссылки

1. **Абд Али, Л.М.** Анализ производительности гибридных фото-ветроэлектрических установок / Абд Али, Лаит Мохаммед А., Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5, № 2. С. 61–68.
2. **Абдали, Л. М.** Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок /Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С.102–112. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-1-102-112](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-1-102-112)
3. Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Kakushina E.G. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 223-228. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040054>.
4. Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A. Lyamina, N.V. Some Results of a Study of Wave Energy Converters at Sevastopol State University. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 256-259. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040029>.
5. Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 229-234. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1904008X>.
6. Guryev V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 242-246. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040042>.
7. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H., Abd Ali L.M. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell). *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. [doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418).
8. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohammed and HusamAbdulhuseinWahhab. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. [doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673](https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673).
9. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.

10. Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A.. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 313 - 320. Doi :10.5937/jaes18-24460.
11. Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
12. Кувшинов, В., Абдали, Л., Морозова, Н., Крит, Б., Аль-Руфай, Ф., & Исса, Х. (2021). Экспериментальные исследования приемных поверхностей плоских солнечных коллекторов. *Электронная обработка материалов*, 57(1), 75-81. DOI: [10.5281/zenodo.4456690](https://doi.org/10.5281/zenodo.4456690)
13. Abd Ali L.M., Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 3698-3706. DOI: [10.36478/jeasci.2019.3698.3706](https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.3698.3706)
14. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Исса Х.А., Мохаммед Х.Д., Якимович Б.А., Моделирование и контроль энергии ветра, X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов", - Томск: ТПУ, 22–24 апреля 2020 г., с. 14-19.
15. Абдали Л.М. Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии / Л.М. Абдали, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров, Ф.М. Аль-Руфай // *Строительство и техногенная безопасность*. — 2020. — № 18(70). — с.133-142. — DOI: [10.37279/2413-1873-2020-18-133-142](https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-18-133-142).
16. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali L.M., Al Bairmani A.G., Ghachim M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using TMMT Algorithm. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 96-101. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-1-96-101](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-1-96-101)
17. Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотоэлектрики / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2020. Т. 23, № 2. С. 100–108. doi: [10.22213/2413-1172-2020-2-100-108](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-2-100-108).
18. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Мохаммед Х. Д., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Моделирование гибридной фото-ветроэнергетической системы с сетевым подключением. В сборнике: *Возобновляемые источники энергии. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы*, 2020, С. 117-128.
19. **Исса, Х. А.** Моделирование фотоэлектрического модуля с помощью программы matlab, X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов" / Х. А. Исса, Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, М. Ф. Мансор, Х.Д. Мохаммед. - Томск: ТПУ, 22-24 апреля 2020, с.116-122

Ali Q. A.<sup>1</sup>, Абдали Л. М.<sup>2</sup>, Мохаммед Х.Д.<sup>1</sup>, Исса Х.А.<sup>2</sup>, Korovkin N.V.<sup>1</sup>

## OUTPUT ANALYSIS AND SIMULATION OF AN AUTONOMOUS PHOTOELECTRIC SYSTEM

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University<sup>1</sup>  
Sevastopol State University<sup>2</sup>

**Abstract.** Over the last few decades, the use of renewable energy, especially solar energy, has gotten a lot of attention. In several countries, photovoltaic (PV) power generation projects are being introduced in large numbers. To evaluate and check the efficiency of PV modules, numerous studies have been performed. Due to practical limitations, implementing the experimental configuration for a PV-based power system with a DC-DC converter to verify the system's output is not always feasible. A software-based simulation model aids in the analysis of PV results, while a common circuit-based model that can be used to validate any commercial PV module would be more beneficial.

In this research the simulation of an arithmetical model for a photovoltaic system a DC-DC buck converter and a load. As a generalized PV module, the model described in this paper can be used to test the performance of any commercially available PV module.

**Keywords:** Autonomous PV system, Matlab / Simulink, PV panels, battery, controller, load, performance, temperature

### References

- [1] AbdAli Laith Mohammed A., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Performance Analysis of Hybrid Photo-Wind Turbines]. *Energeticheskiyeustanovki i tekhnologii*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 61-68 (in Russ.).
- [2] Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Smart Control System for the Wind Energy Networks // *Vestnik IzGTU imeni M.T. Kalasnikova*. - 2021. - Vol. 24. - N. 1 - P. 102-112. doi: [10.22213/2413-1172-2021-1-102-112](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-1-102-112)
- [3] Kuvshinov V.V., Abd Ali L.M., Kakushina E.G. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 223-228. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040054>.
- [4] Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A. Lyamina, N.V. Some Results of a Study of Wave Energy Converters at Sevastopol State University. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 256-259. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040029>.
- [5] Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 229-234. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1904008X>.
- [6] Guryev V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 242-246. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040042>.
- [7] Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H., Abd Ali L.M. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell). *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418.
- [8] Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohammed and HusamAbdulhuseinWahhab. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673.
- [9] Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.



- [10] Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 313 - 320. doi :10.5937/jaes18-24460.
- [11] Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
- [12] Kuvshinov, V. V., Morozova, N. V., Abd Ali, L. M., Krit, B. L., Al-Rufae, F. M., & Issa, H. A. (2021). Experimental studies for the receiving surfaces of solar flat collectors. *Электронная обработка материалов*, 1(57), 75–81. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4456690>
- [13] Abd Ali L.M., Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 3698-3706. doi.org/10.3923/jeasci.2019.3698.3706.
- [14] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Issa Kh.A., Mohammed Kh.D., Yakimovich B.A., [Modeling and control of wind energy], X Vserossiyskayanauchno-prakticheskayakonferentsiya "Nauchnayainitsiativainostrannykhstudentov i aspirantovrossiyskikhvuzov", - Tomsk: TPU, April 22-24, 2020, p. 14-19(in Russ.).
- [15] Abdali L.M. Development of the simulation and control system for an integrated solar energy generation and storage / L.M. Abdali, V.V..Kuvshinov, E.A. Bekirov, F.M. Al-Rufae // Construction and industrial safety. — 2020. — № 18(70). — p.133-142. — DOI: [10.37279/2413-1873-2020-18-133-142](https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-18-133-142).
- [16] Fazal, M.R.; Kamran, M.; ul Haq, I.; Abbas, Z.; Ayyaz, M.N.; Mudassar, M. Modified Perturb and Observe TMMT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2019, 9, 721-731.
- [17] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Optimization of Energy Storage in Hybrid Wind and Photovoltaic Energy Systems]. *VestnikIzhGTUimeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 100-108 (in Russ.). DOI: [10.22213/2413-1172-2020-2-100-108](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-2-100-108).
- [18] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Mohammed H.D., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Modeling of a hybrid photo-wind power system with a mains connection V sbornike: Vozobnovlyayemye istochniki energii. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem i XII nauchnoy molodezhnoy shkoly*, 2020, S. 117-128. (in Russ.).
- [19] Issa H. A., Abdali L. M., Al-Rufai F. M., Mansor M. F., Mohammed H. D., [Modeling a photovoltaic module using the matlab program]. X Vserossiyskayanauchno-prakticheskayakonferentsiya "Nauchnayainitsiativainostrannykhstudentov i aspirantovrossiyskikhvuzov", - Tomsk: TPU, April 22-24, 2020, pp. 116-122 (in Russ.).

Ф. М. Аль-Руфай<sup>1</sup>, В. В. Кувшинов<sup>1</sup>, Л. М. Абдали<sup>1</sup>, Х. Д. Мохаммед<sup>2</sup>

## РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ РАЙОНАХ

Севастопольский государственный университет<sup>1</sup>  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого<sup>2</sup>

**Аннотация:** Целью данной работы является рассмотрение возможности использования гибридных составных конструкций для энергоснабжения сельских районов, а также разработка эффективной системы солнечных и дизельных генераторов. Дизельный генератор объединен с аккумуляторными батареями на основании того, что энергия солнца не бывает постоянной на протяжении всего времени. Моделирование выполнено с использованием программы HOMER, позволяющей детально проанализировать объем и мощность энергии, генерируемой предлагаемой системой. По результатам проведенного исследования установлено: наиболее эффективным решением для экономии электроэнергии в сельских районах, которые не обслуживаются или не подключены к сети, является система питания солнечных элементов, а также дизельный генератор с батареями.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, дизельный генератор, солнечная энергия, аккумулятор, HOMER.

Регулярное снабжение электроэнергией - одно из важнейших требований, предъявляемых к непрерывному нормальному функционированию промышленной, коммерческой, бытовой и сельскохозяйственной деятельности человека. С течением времени спрос на электроэнергию не падает, а только продолжает расти. Именно поэтому электрическая энергия считается одной из движущих сил роста экономики любого государства. В то же время значительно выросший потребительский спрос оказывает серьезное давление на инфраструктуру стран, побуждая соответствовать возросшим запросам [1].

Сегодня для выработки электроэнергии в отдаленных сельских районах обычно используются дизельные генераторы. За последние годы цены на топливо и производство электроэнергии показали значительный рост. Крайне актуальной также остается проблема глобального потепления климата. Причиной ее возникновения стало значительное повышение температуры атмосферы планеты, произошедшей в результате постоянного сжигания ископаемого топлива в огромных количествах. Реальной альтернативой чистой энергии могут стать лишь ее возобновляемые источники [2].

Для сокращения потребления топлива, необходимого для производства электроэнергии, некоторое время назад начали использовать энергию солнца, ветра и т.п. Обеспечить непрерывное генерирование энергии способна гибридная фотоэлектрическая-дизельная энергетическая система [3].

Многие сельские районы Ирака, как и ранее, сталкиваются с трудностями в получении электроэнергии, из-за удаленности от основной сети электроснабжения или вследствие отсутствия вырабатываемой электроэнергии. Ирак расположен между широтами  $29^{\circ} 5'$  и  $37^{\circ} 22'$  северной широты, а также  $38^{\circ} 45'$  и  $48^{\circ} 45'$  восточной долготы. Страна находится в непосредственной близости от солнечного пояса, который в среднем получает 6,5-7 кВт.ч излучения на квадратный метр. Периоды солнечной активности: от 2500 до 3500 часов в год [4,5]. Такая особенность позволяет правительству Ирака решить проблему дефицита электроэнергии при помощи энергии солнца.

Солнечная энергия – одно из наиболее эффективных средств выработки электроэнергии в местах, удаленных от национальной сети, но отличающихся изобилием солнечного света. Таким образом, солнечная энергия является главным источником энергии для всей системы. В качестве резервного источника в настоящее исследование включены дизельный генератор и батареи. Для моделирования предлагаемой системы выработки электроэнергии использован Homer Software.

Преимущества программы HOMER, разработанной NREL[6]:

- помогает в разработке точных энергетических систем;
- упрощает сравнение различных методов производства электроэнергии;
- позволяет проектировщику сравнить множество вариантов дизайна на основе технических и экономических характеристик;
- имитирует работу системы;
- рассчитывает энергетический баланс за 8760 час в год.

### **Фото-дизельная энергетическая система**

Гибридные - это системы, состоящие из одного или нескольких возобновляемых источников энергии, например, солнечная энергия, энергия ветра либо иные (дизельные генераторы и т.п.). Гибридная система обеспечивает выработку и поставку качественной, чистой электроэнергии. Во многих случаях именно она считается более эффективной по сравнению с одиночными дизельными системами с точки зрения материальных затрат. Поэтому использование возобновляемых источников энергии становится все более предпочтительным решением для автономного производства электроэнергии [2,7].

В данном исследовании под системой понимается гибридная система, объединяющая солнечные фотоэлектрические и дизельные элементы с целым рядом батарей рис. 1. Фотоэлектрические блоки обеспечивают более высокую надежность, чем отдельные элементы, поскольку энергоснабжение не полностью зависит от какого-либо одного источника. Например, в ветреный облачный день, когда выработка электроэнергии на фотоэлектрических электростанциях низкая, для компенсации потери солнечной электроэнергии используется дизельный генератор [8].

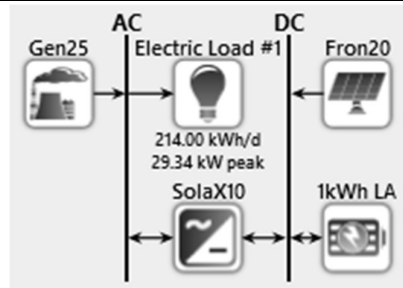


Рис.1 Модель PV-дизеля, использованная в исследовании

### Данные профиля нагрузки

В отдаленной сельской местности электроэнергия преимущественно используется для освещения помещений и улиц, обеспечения бесперебойной работы бытового оборудования и мобильных устройств. Идентификационный файл суточной нагрузки показан на рис. 2. Максимальный спрос на услуги наблюдается в период между 13:00 и 21:00 часами. Такая ситуация складывается из-за того, что в сельских районах основная нагрузка приходится на обеспечение охлаждения и освещения. Файл загрузки сайта по месяцам показан на рис. 3.

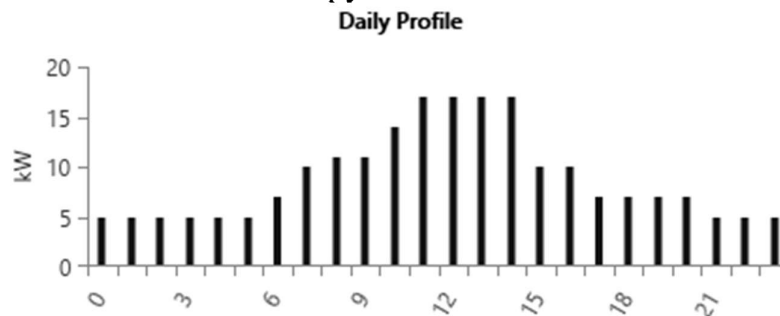


Рис.2 Суточный профиль нагрузки

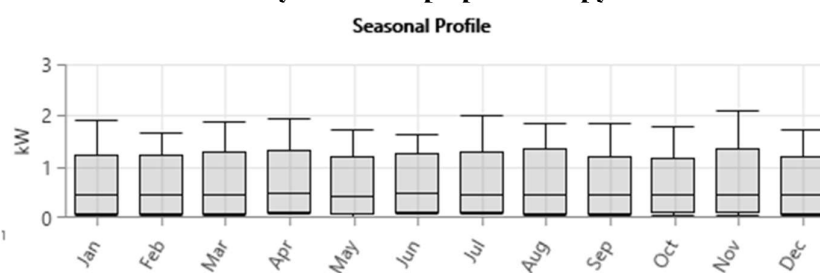


Рис.3 Ежемесячный профиль нагрузки

### Фотоэлектрические модули

Фотоэлектрические системы состоят из модулей. Последние также включают несколько последовательно или параллельно связанных солнечных элементов, образующих солнечную батарею. Уравнение показывает количество энергии, вырабатываемой фотоэлектрической системой [9].

$$E_{pv} = A \times \eta_m \times P_f \times \eta_{pc} \times I,$$

где  $A$  - площадь фотоэлектрических модулей ( $m^2$ ),  $\eta_m$  - эффективность модуля (0,111),  $P_f$  - коэффициент упаковки (0,9),  $\eta_{pc}$  - КПД кондиционирования (0,86),  $I$  - излучение ( $кВт\ ч/m^2$ )

Фотоэлектрические массивы моделируются HOMER как устройства, генерирующие электрическую энергию постоянного тока, пропорционально воздействию на них солнечного излучения, вне зависимости от температуры и напряжения. В этом анализе использовались СФЭС 20 кВт. На рис. 4. показаны данные о ежемесячном горизонтальном солнечном излучении предлагаемого участка.

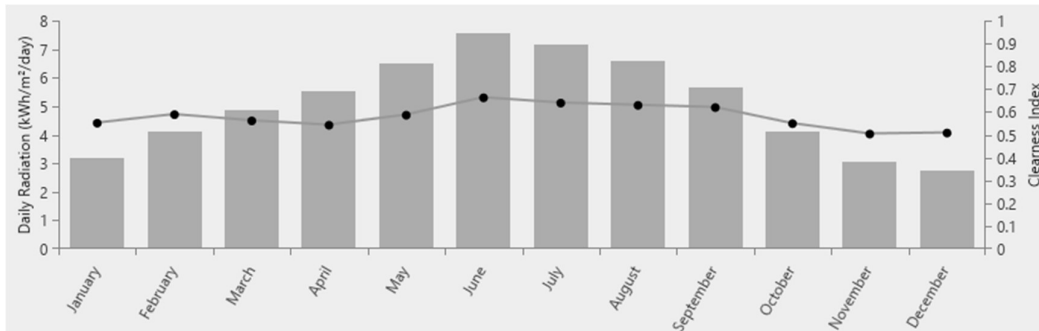


Рис.4. Солнечное излучение

### Аккумуляторы

Аккумуляторные батареи используются в качестве резервного оборудования. Оборудование следует использовать для поддержания постоянного напряжения в периоды пиковой нагрузки или во время отсутствия генерирующих мощностей. Программа моделирует ряд отдельных аккумуляторов для создания взаимосвязанного банка аккумуляторов в параллельном ряду, а также определяет, будут ли батареи заряжаться или разгружаться в час. Тип батареи, предложенный в исследовании, LA - 1 кВт ч.

### Дизельный генератор

Предлагаемый в исследовании дизельный генератор для обеспечения требуемой нагрузки может работать непрерывно. Кроме того, определен размер генератора, который будет модернизирован в будущем. Нагрузка не превышает 80% мощности генератора, во избежание перенапряжения. Предлагаемый дизельный генератор имеет мощность 25 кВт. Программа HOMER решает, как запускать генераторы каждый час.

### Конвертер

Конвертер представляет собой электронное силовое устройство. Оборудование такого типа требуется в системе для поддержания энергетического потока между электрическими компонентами переменного и постоянного тока. Размер конвертера, используемого в указанной системе, составляет 10 кВт.

## Результаты

В HOMER процесс моделирования малой энергосистемы в час осуществляется на ежегодной основе. Предлагаемая сельская система функционирует на основе коэффициентов ввода (солнечное излучение, нагрузка, технические спецификации), которые разъясняются заранее.

В данном исследовании система содержит 20 кВт СФЭС, 10 кВт конвертер и 119 аккумуляторы. Программа имитирует многие компоненты системы для достижения оптимального состава системы (рис.5). Несмотря на то, что программа предлагает вариант, наиболее доступный по цене, мы отказались от анализа текущей стоимости системы.

Architecture									
				Fron20 (kW)	Fron20-MPPT (kW)	Gen25 (kW)	1kWh LA	SolaX10 (kW)	Dispatch
⚠	☀	🔌	🔋	25.0	20.0	25.0	119	10.0	LF
⚠	☀	🔌	🔋	20.0	20.0	25.0		10.0	CC
	☀	🔌	🔋			25.0	238	10.0	CC

Рис.5. Результат моделирования HOMER программы

На основе результатов моделирования мы отмечаем следующее. Дефицит электроэнергии в 0% свидетельствует: предлагаемая система пригодна для обеспечения 100% требуемой электрической нагрузки и не допускает какой-либо нехватки электроэнергии в течение года.

На рис. 6-8 показаны возможности генерирования энергии из солнечных элементов и дизельных генераторов в разные месяцы года.

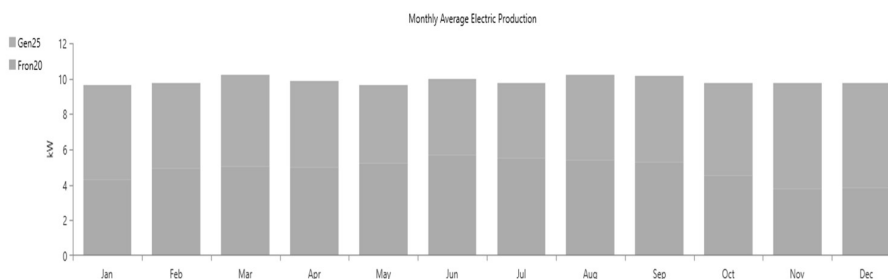


Рис. 6. Среднемесячное производство электроэнергии

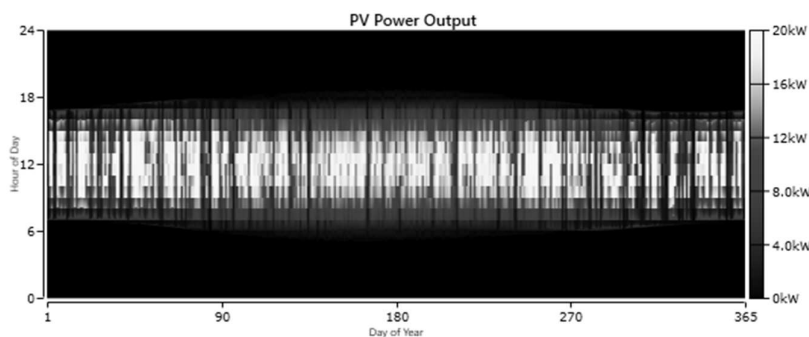
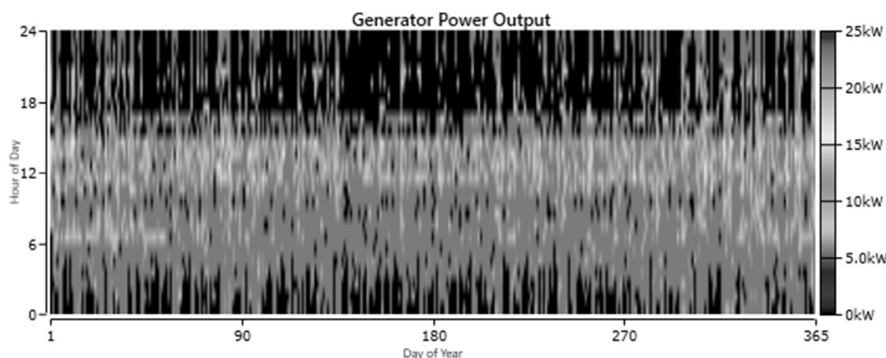


Рис. 7. Выход PV.



**Рис. 8. Мощность дизель-генератора**

Производство электрической энергии в июле является высоким, а в январе – низким, благодаря использованию солнечных батарей в течение этих месяцев.

### **Заключение**

В исследовании рассматривалась энергетическая система, состоящая из солнечных элементов и дизельного генератора, как оптимальная, наиболее эффективная, а также полностью удовлетворяющая спрос на электронагрузку в сельских районах при наличии солнечной энергии. Моделирование проводилось с применением HOMER и использованием данных о солнечной радиации, предоставленных программой, спроса на нагрузку и технических спецификаций. Благодаря полученным положительным результатам, можно предоставить большое количество решений, которые станут хорошей альтернативой современным системам. Любые из них могут использоваться для самостоятельного производства энергии с тем, чтобы электроэнергии в удаленных сельских районах всегда было достаточно, вне зависимости от наличия сети. Система, рассмотренная в нашем исследовании, помогает сократить потребление топлива при сбережении энергообеспечения сельского жилья. Мы также предлагаем использовать комбинированные ветровые и солнечные системы для увеличения существующей выработки электрической энергии в различные периоды года.

### **Библиографический список**

1. Kaundinya, D.P., Balachandra, P. & Ravindranath, N.H. (2009) -Gridconnected versus standalone energy systems for decentralized power-A review of literature', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 2041–2050.
2. **Лукутин, Б.В.** Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями; учеб. пособие/ Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015, 128 с.
3. **Абдали, Л. М.** Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфаи, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2020. Т. 23, № 2. С. 100–108. DOI:10.22213/2413-1172-2020-2-100-108.
4. Guryev, V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle

- 
- East, Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 3, pp 189–194. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030034>.
5. **Аль-Руфай, Ф. М.** Оценка потенциала ветроэнергетических ресурсов на юге Ирака / Ф. М. Аль-Руфай, Л. М. Абдали, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 105–113. DOI: [10.22213/2413-1172-2020-3-105-113](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-3-105-113).
  6. Abd Ali, L.M., Al-Rufae, F.M., Kuvshinov, V.V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. Appl. Sol. Energy 56, 284–290 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>
  7. Patel, M.R., —Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, “ 2nd Ed, Boca Raton: Taylor & Francis Group. 2006
  8. K. Kusakana and H. J. Vermaak, "Hybrid Photovoltaic-Wind system as power solution for network operators in the D.R.Congo," 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011, pp. 703-708, doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036357.



F. M. Al-Rufae<sup>1</sup>, V. V. Kuvshinov<sup>1</sup>, L. M. Abdali<sup>1</sup>, H. J. Mohammed<sup>2</sup>

**DEVELOPMENT OF COMBINED STAND-ALONE POWER SUPPLY SYSTEMS OF LOW POWER WITH SOLAR ENERGY FOR ELECTRICITY GENERATION IN RURAL AREAS**

Sevastopol State University<sup>1</sup>

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University<sup>2</sup>

**Abstract:** The objective of this work is to consider the use of hybrid combined designs for rural energy supply and to develop an efficient solar and diesel generator system. The diesel generator is combined with the batteries on the basis that the energy of the sun is not constant throughout time. The simulation is carried out using the HOMER program, which makes it possible to analysis in detail the amount and power of energy generated by the proposed system. The study found that the most effective solution for saving electricity in rural areas that are not served or connected to the grid is solar cell power, as well as a diesel generator with batteries.

**Keywords:** Renewable energy, diesel generator, solar energy, battery, HOMER

**References**

- [1] Kaundinya, D.P., Balachandra, P. & Ravindranath, N.H. (2009)-Gridconnected versus standal one energy systems for decentralized power-A review of literature', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 2041–2050.
- [2] Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. “Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami”, *uchebnoye posobiye/ B.V. Lukutin, I.O. Muravlev, I.A. Plotnikov – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, 128 pp. (in Russ.).
- [3] Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Optimization of Energy Storage in Hybrid Wind and Photovoltaic Energy Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 100-108 (in Russ.).
- [4] Guryev, V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle East, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp 189–194. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030034>.
- [5] Al-Rufai F.M., Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. [Assessment of the Potential of Wind Energy Resources in Southern Iraq]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 105-113. (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-105-113.
- [6] Abd Ali, L.M., Al-Rufae, F.M., Kuvshinov, V.V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy* 56, 284–290 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>
- [7] Patel, M.R., —Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, “ 2nd Ed, Boca Raton: Taylor & Francis Group. 2006
- [8] K. Kusakana and H. J. Vermaak, "Hybrid Photovoltaic-Wind system as power solution for network operators in the D.R.Congo," 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011, pp. 703-708, doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036357.

**Д.И. Боровинский**

## **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ГАЗОВЫХ СИСТЕМ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук

**Аннотация:** В статье рассмотрена взаимосвязь между двумя системами энергетических инфраструктур. Проведен анализ взаимозависимого поведения сетей электроэнергетических и газовых систем с точки зрения каскадных эффектов сбоев. Предложен проект архитектурной модели базирующегося на интегрированном моделировании.

**Ключевые слова:** энергетическая структура, энергоснабжение, эффективность, имитационная модель.

Мировая энергетическая система находится на пути перехода к низкоуглеродной экономике, при этом увеличивается спрос на природный газ, а мировое потребление природного газа быстро растет. Эксплуатация и планирование системы снабжения природным газом на переходной стадии с множеством источников поставки, конечных потребителей и крупной инфраструктурой с множеством подсистем – сложные задачи. Сезонное и пространственное несоответствие спроса и предложения природного газа еще более усложняет задачу строительства инфраструктуры и планирования распределения природного газа. Технологии количественного анализа необходимы для облегчения принятия решений на переходной стадии системы природного газа.

Для анализа влияния взаимозависимостей между газовыми и электроэнергетическими системами с точки зрения безопасности энергоснабжения газовых электростанций в электрической системе необходима интегрированная имитационная модель, поскольку обе системы зависят друг от друга и сбой, вызванный в любой из систем, распространяются от одной системы к другой.

Энергетические инфраструктуры, включая нефтяные системы, природный газ и электроэнергию, обеспечивают топливом структурные объекты для непрерывного и надежного функционирования национальной или региональной безопасности, экономических операций, а также общественного здравоохранения. Нарушение или сбой функциональности этих инфраструктур привели бы к ослаблению влияния на оборонно-экономическую безопасность и качество жизни. Системы энергетических инфраструктур не изолированы, а все более взаимосвязаны и взаимозависимы с развитием современных технологий. Так, надежное электроснабжение является необходимостью во всей системе газоснабжения для поддержания нормальной работы. Доставка природного газа является необходимым условием для выработки электроэнергии на газовых электростанциях. Более высокая взаимосвязь между системами энергетических инфраструктур делает всю энергетическую систему более уязвимой, поскольку

нарушение, происходящее в одной системе имеет последствия для других зависимых. Эти тесные связи увеличивают риск потенциальных аварий, вызванных каскадными эффектами преднамеренных и непреднамеренных сбоев.

Для обеспечения энергетической безопасности данный аспект необходимо рассмотреть с различных сторон, вытекающих из политических и естественных наук, инженерии, экономики и системного анализа. Первый аспект в основном имеет дело со стратегической безопасностью, международными отношениями и политической наукой, в то время как второй имеет дело с физической уязвимостью динамических, интегрированных энергетических систем и включает в себя концепции инженерии и естествознания. Последний вид устойчивости, которая возникла из экономики и науки о сложности, основан на повышении устойчивости энергетической системы от различных сбоев и защите системы от угроз с помощью долгосрочных инвестиций и технологий. Электричество и газ – это две важные системы энергетических инфраструктур, и обе они полагаются на сети, работающие на уровне передачи (высокоточные электрические сети или газовые сети высокого давления соответственно) и на уровне распределения (слаботочные электрические сети или газовые сети низкого давления соответственно) для доставки энергии из точек генерации конечным потребителям. Традиционно операции и оценка двух систем обрабатываются отдельно, однако электрические и газовые системы взаимозависимы, и каждая система оказывает значительное влияние на производительность и эффективность друг друга. Сеть газовой системы состоит из различных компонентов, которые зависят от электрической мощности для работы сети (электроприводные компрессоры, подземные хранилища газа, ключевые клапаны, регуляторы, буровые установки и т.д.). Кроме того, использование электроприводных компрессоров увеличивается за счет снижения затраты на монтаж и техническое обслуживание. Кроме того, многие регионы устанавливают нормы выбросов, которые обязывают использовать компрессоры с электрическим приводом. С другой стороны, электрические сети используют газ в качестве безопасного и надежного ископаемого топлива главным образом из-за его экологичности и глобального распространения.

Анализируя взаимозависимое поведение сетей электроэнергетических и газовых систем с точки зрения каскадных эффектов сбоев из одной системы в другую в контексте энергетической безопасности, рассматриваются и исследуются последствия сбоя электрической, газовой системы или отказ трубопровода, линии электропередачи.

В рамках моделирования необходимо проследить взаимозависимости и их влияние на распространение отказов структуры каскадного процесса отказа.

Интегрированная имитационная модель должна включать в себя модель потока мощности переменного тока и полную гидравлическую газовую модель для точного представления реальных последствий. С учетом того, что динамика в сети газовой системы протекает медленнее, чем в электрической, то временные шаги моделирования считаются различными. В дальнейшем эффективность модели необходимо исследовать при различных сценариях разрушения. Комплексный анализ системы даст хорошие знания об уязвимостях

электроэнергетической и газовой системы, которые не могут быть обнаружены путем анализа систем по отдельности.

### Имитационная модель

Архитектура проектной модели базируется на интегрированном моделировании и состоит из электрического инструмента моделирования на основе модели потока питания переменного тока, проектным инструментом моделирования газовой системы является гидравлическая модель. Для разработки интегрированной имитационной модели необходимо определение среды программирования и выбор правильных инструментов и методов. Проектный подход имитационной модели показан на рисунке 1.



Рис. 1. Интегрированная модель электро-газоснабжения

**Библиографический список**

1. **Илькевич, Н.И.**, Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения / Илькевич Н.И., Дзюба Т.В., Калинина Ж.В. – Новосибирск: Наука, 2014. – 217 с.
2. Топливо-энергетический комплекс Иркутской области: современное состояние и перспективы развития / под редакцией Санеева Б.Г., Воронина П.А.. ИД "Энергия", 2013. – 304 с.
3. BP. Издание BP World Energy Outlook 2017. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>.
4. Natural Gas Market Module of the National Energy Modeling System: Model Documentation, 2018. – 140 с.

**D. I. Borovinsky**

**ANALYSIS OF ELECTRIC POWER AND GAS SYSTEMS**

Federal State Budgetary Institution of Science  
L. A. Melentyev Energy Systems Institute  
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**Abstract:** The article considers the relationship between two systems of energy infrastructures. The analysis of the interdependent behavior of networks of electric power and gas systems in terms of cascade effects of failures is carried out. The project of an architectural model based on integrated modeling is proposed.

**Key words:** energy structure, energy supply, efficiency, simulation model.

**References**

- [1] Ilkevich N. I., Multilevel modeling of gas supply systems development / Ilkevich N. I., Dzyuba T. V., Kalinina Zh. V. - Novosibirsk: Nauka, p. 217, 2014 (in Russian)
- [2] Fuel and energy complex of Irkutsk region: current state and prospects for development /ed. by B.G.Saneev, P.A. Voronin, p. 304, 2013 (in Russian)
- [3] BP. Publication BP World Energy Outlook 2017. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>.
- [4] Natural Gas Market Module of the National Energy Modeling System: Model Documentation, p. 140, 2018 (in USA).

УДК 621.311.

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_331

Е.М. Гецман, Н.А. Попкова

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

**Аннотация:** В статье рассмотрена перспектива развития систем накопления энергии, с учетом структуры и особенностей функционирования энергетической сферы Республики Беларусь. Проведен анализ структуры динамики генерации в ОЭС Беларуси с учетом ввода Белорусской атомной станции (БелАЭС). Рассмотрена возможность привлечения накопителей энергии для обеспечения стабильной выдачи мощности от возобновляемых источников энергии в составе энергетической системы страны.

**Ключевые слова:** накопители энергии, генерация, возобновляемые источники энергии.

Энергетический баланс Республики Беларуси в объединенной энергосистеме (ОЭС) представлен следующим соотношением между основными видами электрогенерирующих установок: порядка 40% электроэнергии планируется вырабатывать за счет БелАЭС, 60% – тепловые электрические станции и теплоэлектроцентрали, работающие в основном на природном газе, потребление которого в перспективе будет замещаться возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [1].

В производстве электрической энергии и основой энергетической модели Республики Беларусь составляют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ – паротурбинные и парогазовые), конденсационные электростанции (КЭС) и котельные, а также многочисленные блок-станции на базе когенерационных установок. Кроме того, в меньшей степени в ее состав входят гидростанции (ГЭС) с установленной мощностью порядка 250 МВт и небольшая доля введенных ветроэнергетических установок (ВЭР) порядка 9 МВт, находящихся на балансе ГПО «Белэнерго» (рис.1) [1].

Согласно (рис.1) выраженные изменения относительно аналогичной структуры генерации до ввода БелАЭС отражает замещение генерации КЭС, но и частичное увеличение генерации ТЭЦ. При этом замещение выработки ТЭЦ в основном обуславливается фактом работы АЭС в базовой части графика покрытия потребления, путем не привлечения АЭС к регулированию изменения активной мощности, что впоследствии приводит к вынужденным и длительным разгрузкам ТЭЦ ниже теплового графика.

Для наглядности приведена табл. 1 для блок-станций, использующих ВИЭ.

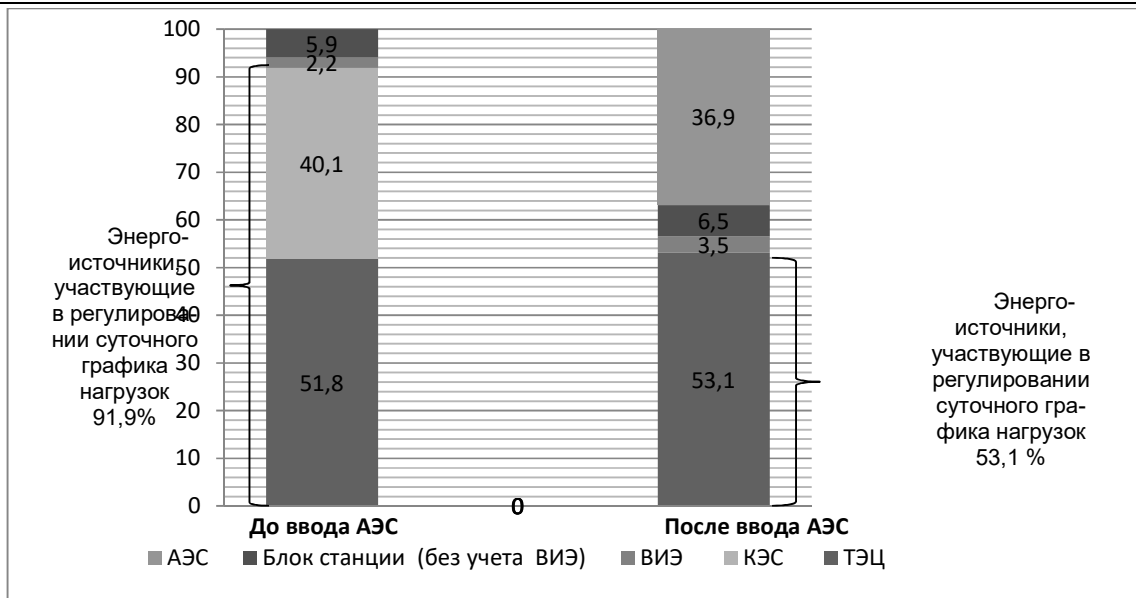


Рис.1. Структура мощности в типовой зимний день

Можно отметить, что среди ВИЭ наибольшую долю занимают вода (энергия движения водных потоков 40,93 %) и ветер 26,23 %.

Таблица 1

Структура установленной мощности потребительских блок-станций, использующих ВИЭ в качестве топлива

Виды топлива	Установленная мощность, МВт	Доля источника ВИЭ от установленной мощности
ИТОГО по блок-станциям:	<b>1176,688</b>	
возобновляемые источники (ВИЭ):	<b>391,569</b>	—
-солнце	160,31	40,93
-ветер	102,652	26,23
-вода	7,278	1,97
-биогаз	37,259	9,53
-древесное топливо	3,08	0,79
-иные (сточные воды)	0,5	0,13
-биомасса	80,04	20,43

С началом эксплуатации БелАЭС на первый план выходит вопрос регулирования баланса генерации-потребления электрической мощности. Следовательно, для неразрывности процессов производства и потребления электрической энергии одним из факторов является ограничение возможности полного использования установленной мощности генерирующего оборудования станций, что непосредственно влияет на конфигурацию графика генерации электрической энергии. Это приводит к вынужденным изменениям графика



электропотребления и не позволяет обеспечить равномерную загрузку генерирующего оборудования в течение суток.

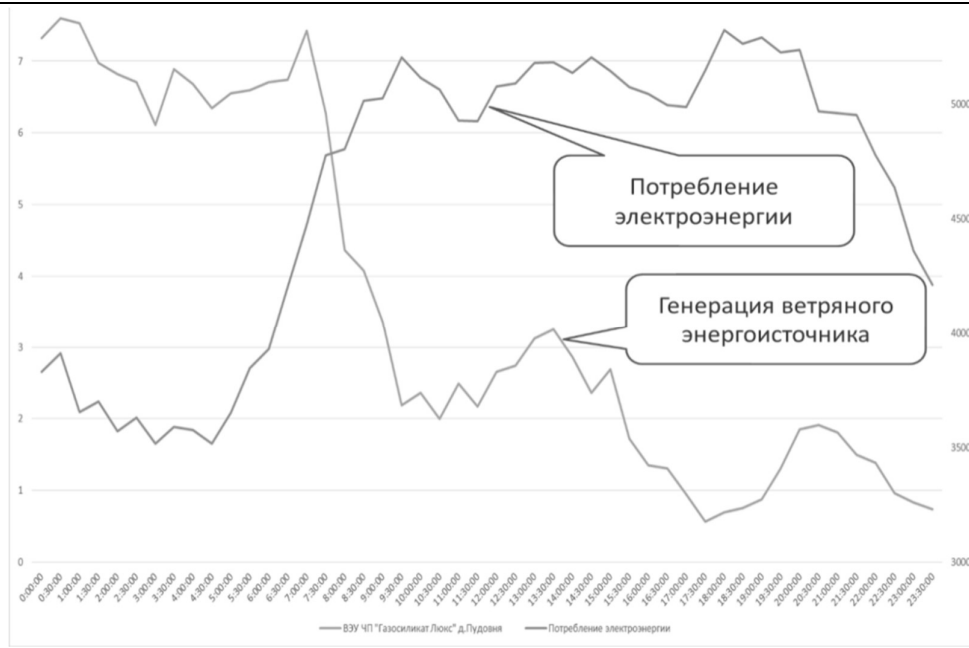
В этом случае для обеспечения надежной и экономичной работы энергосистемы и энергоснабжения потребителей необходимо предусмотреть одновременное поддержание резерва мощности на оборудовании электростанций. Иначе возникает проблема обеспечения баланса генерации-потребления из-за нехватки регулировочного диапазона оборудования электростанций. Использование возможностей создания «искусственного» потребления возможно только для целей регулирования суточного графика и прохождения периодов минимального электропотребления.

Одним из мероприятий для обеспечения баланса электрической мощности в любой момент времени энергосистемы Беларуси явилось строительство электрических котлов на крупных энергоисточниках ГПО «Белэнерго». В ОЭС Беларуси на 20 объектах установлено 34 электробойлерные установки, из них 25 – на ТЭЦ и КЭС, 9 – на котельных [2]. Суммарная установленная мощность составляет 916 МВт, которую они могут потреблять в ночные часы, обеспечивая выдачу тепловой энергии (разгрузка ТЭЦ ниже теплового графика).

На основании ожидаемого профицита мощности с учетом ввода АЭС и тенденцией изменения прогнозного топливно-энергетического баланса, имеются условия для поддержания баланса потребление-генерация с использованием ВИЭ. Однако отметим, что в отдельные периоды режим работы энергоисточников на базе ВИЭ находится в противофазе с потребностью энергосистемы в электрической энергии [3].

Для преобладающих в структуре ВИЭ (ветер, солнце) характерна нестабильная во времени генерация. Наличие большого объема такой генерации обусловит финансовые издержки Белорусской энергосистемы по компенсации почасовых отклонений сальдо перетоков электрической энергии от согласованных значений. При отклонении в сторону экспорта электроэнергии оплата за данную электроэнергию в периоды времени будет осуществлена по цене ниже себестоимости ее производства на энергоисточниках республики. Следовательно, необходимо предусмотреть обеспечение резервирования мощности из-за возможного снижения допустимой выдачи в часы максимальных нагрузок ввиду неравномерности графика генерации.

Безусловно, для эффективного использования и роста энергоисточников на базе ВИЭ при их строительстве и эксплуатации должно быть неизбежное ужесточение требований насчет наличия у них систем хранения и накопления энергии для привлечения суточного регулирования и выравнивания графика потребления и генерации электроэнергии (рис.2). Поэтому тенденция развития ВИЭ, таких как ветровые и солнечные, при объединении с традиционными электростанциями в единую централизованную энергетическую систему без накопителей энергии невозможна.



**Рис.2. Конфигурация выработки энергоисточника с использованием ветра и потребления ОЭС Беларуси в отопительный период**

Стремительными темпами активно набирает масштабы по развитию мировой рынок систем накопления энергии (СНЭ) [4]. Основная цель данных систем накопления в мировой практике заключается в регулировании частоты и напряжения, обеспечение баланса мощности, а также аккумуляирование излишне вырабатываемой энергии ВИЭ.

Следует учесть, что использование энергетических систем, спроектированных еще в советское время для меньших нагрузок, вызывает интерес к применению накопителей энергии, которые позволят снизить пиковые значения мощностей и использовать действующие ресурсы электрооборудования. Это говорит об эффективном использовании накопителей для снижения дефицита мощностей при росте нагрузок путем повышения коэффициентов полезного действия генераторных установок и снижения технологического расхода электроэнергии при ее транспортировке.

Основная задача заключается в оценке эффективности систем накопителей для групп потребителей, где возникает зависимость следующих параметров: таких как характер нагрузки, применении вида источника электроэнергии и режим их работы, требования к надежности и качеству бесперебойности электроснабжения.

В перспективе это возможно за счет использования электрохимических накопителей электрической энергии в паре с энергоисточниками, использующими ВИЭ, позволяющими плавно сглаживать неравномерность суточного графика потребления за счет их зарядки в часы низкого уровня потребления, и уменьшить количество включенного генерирующего оборудования за счет выдачи электроэнергии в пиковые часы. Таким образом, обеспечивается изменение нагрузки и уменьшается количество времени, по сравнению с традиционно

использующимися для этих целей ГЭС. Это позволяет использовать их в качестве первичного резерва регулирования для поддержания частоты в сети, компенсации нарушений баланса мощностей энергосистемы как по причине аварийного отключения генерирующего оборудования, так и в случаях резкопеременного режима работы энергоустановок ВИЭ и резкого роста электропотребления.

Согласно прогнозным данным Wood Mackenzie, емкость систем хранения энергии в мире (без учёта ГАЭС) будет расти со среднегодовым темпом (CAGR) 31 % до 2030 года. К 2030 году совокупная емкость глобального рынка достигнет 741 ГВт·ч [5]. На рынке согласно лидирующим позициям будут доминировать США и Китай, на которые к 2024 году будет приходиться 54% емкости установленных в мире СНЭ.

Активное внедрение систем накопления энергии (СНЭ) в энергосистемах в какой-то мере позволит преодолеть указанные проблемы. На выбор типа накопителя влияет совместный анализ технических характеристик энергосистемы и накопителя, системы противоаварийной автоматики, вида и интенсивности возмущения в энергосистеме. При этом СНЭ могут управляться локально и с удаленных центров управления. Они могут быть спроектированы таким образом, чтобы очень быстро реагировать на управляющие команды. СНЭ могут потреблять и выдавать активную мощность, а в соединении с устройствами силовой электроники – реактивную мощность.

В случае интеграции систем накопления энергии в составе ВИЭ и в отдельности в энергетическую систему Республики Беларусь позволят:

- 1) обеспечить регулирование частоты и напряжения;
- 2) в зависимости от потребностей энергосистемы СНЭ могут привести к выравниванию во времени графиков потребления и генерации электрической энергии.
- 3) перейти к регулированию электрической мощности на выходе системы
- 4) ВИЭ+СНЭ – расширение возможности диспетчерского управления; повысить эффективность использования энергетических ресурсов.

#### Библиографический список

1. Белэнерго [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli> (дата обращения: 26.03.2021).
2. Отраслевая программа развития электроэнергетики на 2016 – 2020 годы [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.minenergo.gov.by> (дата обращения 29.04.2021).
3. Молочко, А.Ф. Разработка энергетического баланса энергосистемы Беларуси с учетом развития возобновляемой энергетики, в том числе ветроэнергетики: научно-технический отчет / А. Ф. Молочко [и др.]. – Минск : ООО «Альфа-книга», 2019. – 238 с.
4. Накопители энергии [Электронный ресурс]. – URL: <https://energy.hse.ru>. (дата обращения 27.04.2020).
5. Глобальный рынок систем хранения энергии до 2024 года вырастет в 13 раз. [Электронный ресурс] – URL: [https://elektrovesti.net/65299\\_globalnyy-rynok-sistem-khraneniya-energii-do-2024-goda-vyrastet-v-13-raz](https://elektrovesti.net/65299_globalnyy-rynok-sistem-khraneniya-energii-do-2024-goda-vyrastet-v-13-raz) (дата обращения 29.04.2021).

**К.М. Hetsman, N.A. Papkova**

**APPLICATION OF ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS IN THE ENERGY SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

Belarussian national technical university

**Abstract:** The article considers the prospects for the development of energy storage systems, taking into account the structure and features of the functioning of the energy sector of the Republic of Belarus. The structure of generation dynamics in the ECO of Belarus is analyzed taking into account the commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant (BelNPP). The possibility of attracting energy storage devices to ensure a stable supply of power from renewable energy sources in the energy system of the country is considered.

**Key words:** power transmission, power semiconductor devices, energy resources.

**References**

- [1] Belenergo [Electronic resource]. – URL: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli> (Accessed: Mar. 26, 2021).
- [2] Sectoral program for the development of electricity for 2016 – 2020 [Electronic resource]. URL: <https://www.minenergo.gov.by> .(Accessed: Apr. 29, 2021).
- [3] Development of the energy balance of the energy system of Belarus taking into account the development of renewable energy, including wind energy: scientific and technical report / AF Molochko [et al.]. - Minsk: LLC "Alpha Book"2019; (in Russian)
- [4] Energy storage devices [Electronic resource]. – URL: <https://energy.hse.ru>. (Accessed: Apr. 27, 2021).
- [5] The global market for energy storage systems will grow 13 times by 2024 [Electronic resource]. URL:[https://elektrovesti.net/65299\\_globalnyy-rynok-sistem-khraneniya-energii-do-2024-goda-vyrastet-v-13-raz](https://elektrovesti.net/65299_globalnyy-rynok-sistem-khraneniya-energii-do-2024-goda-vyrastet-v-13-raz) (Accessed: Apr. 29, 2021).

Гусев О.Ю., Гусев Ю.П., Южанин А.Е.

## ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ВЫЗВАННЫЕ ОДНОФАЗНЫМИ ЗАМЫКАНИЯМИ НА ЗЕМЛЮ, В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

НИУ «МЭИ»

**Аннотация:** В статье дана оценка термического действия феррорезонансных процессов на обмотки трансформаторов напряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях с компенсированной нейтралью. Исследование выполнено с использованием программного комплекса EMTP-RV (Powersys, Франция). Процессы в сердечниках трансформатора напряжения анализировались на основе математической модели начальных кривых намагничивания. Установлено, что опасность повреждения трансформаторов напряжения или сокращения срока их службы под влиянием феррорезонансных бросков намагничивающих токов, возникающих при отключении однофазных замыканий на землю в электрических сетях с компенсированной нейтралью не значительна, в отличие от сетей с изолированной нейтралью.

**Ключевые слова:** феррорезонанс, распределительная сеть с компенсированной нейтралью, трансформатор напряжения, однофазное замыкание на землю.

В электрических сетях 6 – 35 кВ, при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), напряжение поврежденной фазы уменьшается до нуля, а напряжение относительно земли неповрежденных фаз увеличивается до линейного напряжения сети. При этом емкости неповрежденных фаз сети относительно земли заряжаются до напряжения, близкого к амплитуде линейного напряжения. В месте ОЗЗ, как правило, возникает электрическая дуга, которая гаснет при прохождении тока через нулевое значение. После погасания дуги на фазах сети остается электрический заряд, величина которого определяется емкостями фазных проводников. Статический электрический заряд с фаз сети, после исчезновения ОЗЗ, будет стекать через нейтраль обмотки трансформатора напряжения (ТН) и через дугогасительный реактор в нейтрали сети в землю. Резкое увеличение напряжения на фазных выводах ТН на завершающей стадии ОЗЗ может вызвать феррорезонансный бросок намагничивающего тока (БНТ), значительно превышающий пусковой БНТ, возникающий при подключении к ТН номинального напряжения. После погасания дуги ёмкости фаз сети начинают перезаряжаться. Таким образом, после отключения ОЗЗ в сети появляются условия для феррорезонанса, сопровождающегося дополнительным нагревом первичной обмотки ТН, который может стать причиной отказа ТН, либо причиной сокращения его срока службы. Это подтверждается данными ОРГРЭС: в распределительных сетях ежегодно повреждается 6 - 8% ТН от общего числа,

установленных в сети [1]. Средний срок службы НТМИ-6, НТМИ-10, ЗНОМ-20, ЗНОМ-35 часто не превышает 3 - 5 лет [2].

В статье представлены результаты расчётно-теоретического исследования переходных процессов в сети напряжением 6 кВ с ТН типа НТМИ-6, вызванных самоликвидирующимися ОЗЗ. Расчёты показали, что термическое действие феррорезонансных БНТ, вызванных ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью многократно меньше, чем в сетях с изолированной. Расчёты проводились для участка сети, электрическая схема которого изображена на рис. 1.

Для исследования переходных процессов была разработана расчётная модель (рис. 2) в программном комплексе EMTP-RV (Powersys, Франция). Параметры цепи намагничивания в модели НТМИ-6 –  $L_{mag}$  задавались по начальной кривой намагничивания магнитопровода [3]. Параметры цепей рассеяния обмоток ТН, приведённые в таблице 1, рассчитаны в соответствии с паспортными данными из [4] для класса точности 0,1, соответствующему номинальной мощности 50 В · А. Потери в магнитопроводе учитывались активным сопротивлением  $R_0 = 3,5$  МОм [5]. Отходящие кабельные линии подключались к шинам центра питания через токоограничивающий реактор Р, его сопротивление выбрано из условия ограничения токов трёхфазного короткого замыкания до 8 кА, при постоянной времени  $T_a = 0,045$  с. В модели эквивалентное сопротивление С - сети, Т - трансформатора и Р - токоограничивающего реактора представлены единой RL - цепью с источником ЭДС неизменного напряжения Е в каждой фазе. ОЗЗ имитировалось с помощью замыкания ключа SW1 в фазе А. Размыкание ключа происходило после подачи команды, при прохождении тока через ноль. Сопротивление индуктивности дугогасящего реактора  $L_n$  определялось в зависимости от тока ОЗЗ по условию полной компенсации ёмкостного тока. Фазные ёмкости  $C_f$  и межфазные  $C_{mf}$  рассчитывались исходя из варьируемого значения ёмкостного тока, при этом принималось  $C_{mf} = \frac{1}{3} \cdot C_f$ .

Таблица 1

Паспортные данные НТМИ-6

Наименование параметра	Значение
Первичное линейное напряжение $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , кВ	6
Вторичное линейное напряжение $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ , кВ	0,1
Токи короткого замыкания на выводах «а-в», «в-с», «с-а», А	2,6
Сопротивления постоянному току обмоток «А-В», «В-С», «С-А», Ом при $T = 21^\circ\text{C}$	680
Сопротивления постоянному току обмоток «а-о», «в-о», «с-о», Ом при $T = 21^\circ\text{C}$	1,6
Ток холостого хода вторичных обмоток ТН фаза «а», фаза «в», фаза «с», А	0,331; 0,339; 0,32
Напряжения короткого замыкания ТН, %	1,7

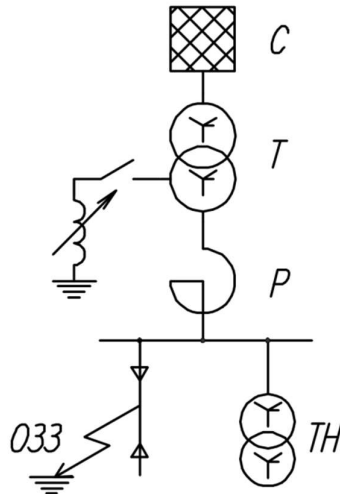


Рис. 1. Схема моделируемого участка распределительной сети

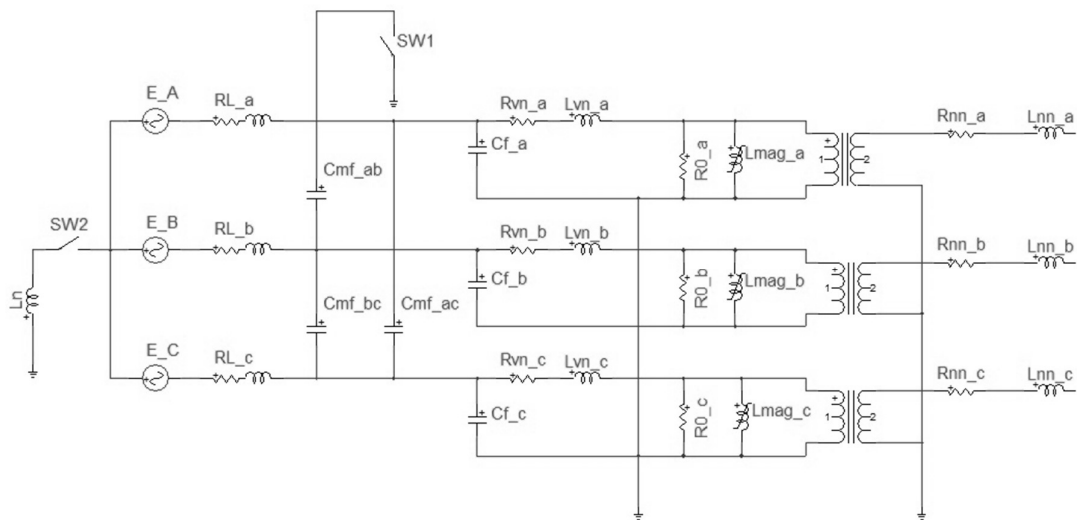


Рис. 2. Схема расчётной модели

Расчетная модель верифицировалась по трем параметрам: по коэффициенту трансформации обмоток ТН, соединенных по схеме «звезда»; по напряжению короткого замыкания и по току холостого хода. Полученные значения приведены в табл. 2. На рис. 3,а приведены верификационные осциллограммы напряжений фаз. Амплитуды напряжений составляют 57,0 В, что соответствует номинальному напряжению сети. Напряжение короткого замыкания проверялась по мощности в классе точности 0,1. Для этого был проведен опыт короткого замыкания, обмотка ВН фазы А закорачивалась, а к обмотке НН фазы А подключался источник с напряжением:

$$U_c = U_k \cdot U_\phi = 0,017 \cdot \frac{100}{\sqrt{3}} = 0,98 \text{ В,}$$

где  $U_k$  – напряжение короткого замыкания, о. е. ;

$U_\phi$  – фазное напряжение вторичной обмотки, В.

Верификационная осциллограмма тока приведена на рис. 3,б, значение тока составляет 287 мА.

Результаты проверки по току холостого хода приведены на рис. 3,в, ток намагничивания на стороне низкого напряжения ТН в модели составляет 380 мА, близко к паспортному значению 331 мА, приведенному в табл. 2. Погрешность тока холостого хода составляет 13%, что обусловлено точностью задания кривой намагничивания ТН.

Таблица 2

## Результаты верификации расчётной модели

Параметр	Значение из паспорта	Расчётное значение модели
Фазные напряжения обмоток, В	3460/57,7	3460/57,0
Ток холостого хода вторичных обмоток, мА	331	380
Напряжение короткого замыкания, %	1,7	1,688

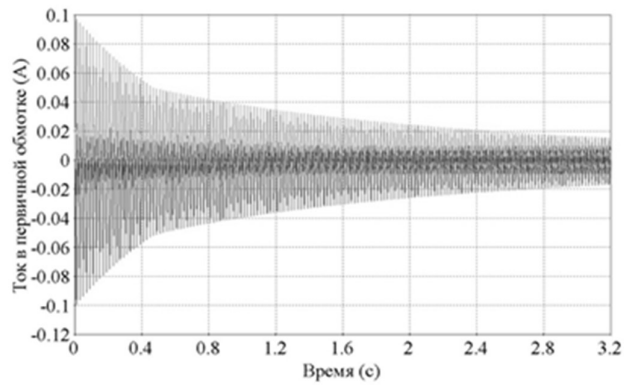
Для оценки тяжести теплового действия феррорезонансного БНТ, возникающего при феррорезонансе, в качестве критерия использовалось значение интеграла Джоуля -  $86 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ , рассчитанное для пускового БНТ, вызванного подключением ТН к сетевому источнику с максимально допустимым линейным напряжением 7,2 кВ. Продолжительность феррорезонансного БНТ определялась по интервалу времени, в течении которого ток в первичной обмотке ТН превышал значение 82 мА, соответствующее паспортному значению предельно допустимой мощности ТН, вне класса точности, 900 В·А, рис. 3,г.

В табл. 3 приведены расчётные значения параметров феррорезонансных процессов при ОЗЗ для значений емкостного тока сети с изолированной и компенсированной нейтралью варьируемых от 10 до 300 А. ТН работал на холостом ходу, вторичная нагрузка у него отсутствовала.

Форма феррорезонансного БНТ в сети с изолированной нейтралью отличается от пускового БНТ, т.к. при отключении ОЗЗ напряжение одной фазы увеличивается, а двух других фаз одновременно уменьшается. Характер изменения среднеквадратичных значений фазных токов в пусковом БНТ обусловлен одновременным увеличением среднеквадратичных значений всех фазных напряжений. По этому признаку можно различать эти БНТ.

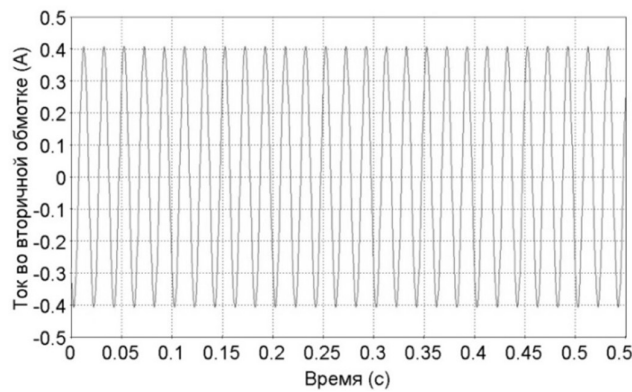
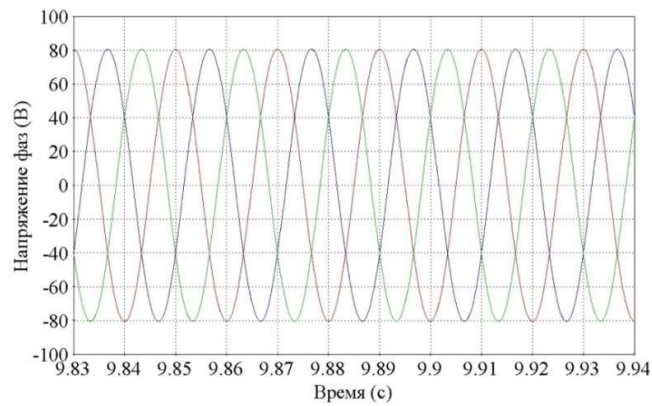
На рис. 4 приведены осциллограммы токов и напряжений феррорезонансных БНТ при отключении ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью. На осциллограммах токов можно увидеть, что амплитуда и частота феррорезонансных колебаний уменьшается, в связи с тем, что рабочая точка на кривой намагничивания возвращается на линейный участок и индуктивность намагничивания увеличивается. Характер феррорезонансного переходного процесса может быть как колебательным, так и апериодическим, в зависимости от соотношения волнового и активного сопротивлений колебательного контура.





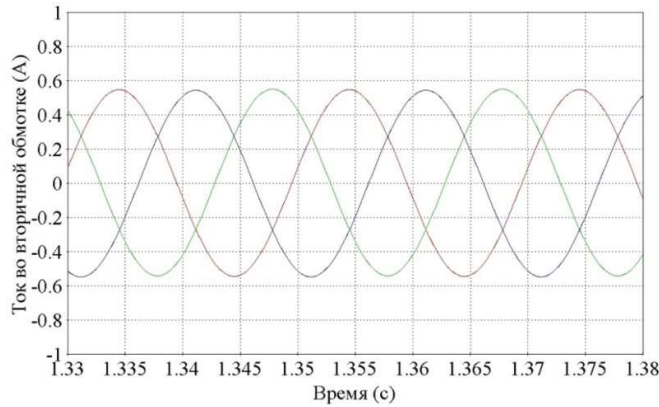
а)

б)



в)

**Рисунок 3. Расчётные осциллограммы напряжения вторичной обмотки ТН, в фазе А (-), в фазе В (-), в фазе С (-) при подключении источника со стороны ВН (а), ток фазы А в опыте короткого замыкания (б), токи холостого хода во вторичной обмотке (в), фазные токи пускового БНТ при подключении источника со стороны ВН (г). (Начало)**



г)

Рисунок 3. Расчётные оциллограммы напряжения вторичной обмотки ТН, в фазе А (-), в фазе В (-), в фазе С (-) при подключении источника со стороны ВН (а), ток фазы А в опыте короткого замыкания (б), токи холостого хода во вторичной обмотке (в), фазные токи пускового БНТ при подключении источника со стороны ВН (г). (Окончание)

Таблица 3

Зависимость параметров феррорезонанса от ёмкостного тока в сети

Ёмкостной ток (ёмкость сети), А	Частота феррорезонансных суб- гармоник, Гц		Пиковое среднеквадратич- ное значение тока в первич- ной обмотке ТН, А -----Продолжительность, с		Значение интеграла Джоуля, А <sup>2</sup> ·с ----- Кратность интеграла Джоуля, о.е.	
	Изолиро- ванная нейтраль	Компен- сиро-ванная нейтраль	Изолиро- ванная нейтраль	Компенсиро- ванная нейтраль	Изо- лиро- ванная нейтраль	Компен- сиро-ванная нейтраль
10 (3 мкФ)	16	Апериодич.	2,91 ----- 2,01	0,076 ----- ≈ 0	0,298 ----- 3465	≈ 0 ----- ≈ 0
50 (15 мкФ)	7	Апериодич.	5,57 ----- 1,88	0,044 ----- ≈ 0	0,818 ----- 9511	≈ 0 ----- ≈ 0
300 (87 мкФ)	2	Апериодич.	8,80 ----- 1,72	0,029 ----- ≈ 0	4,58 ----- 53225	≈ 0 ----- ≈ 0

На рис. 5 представлены оциллограммы токов и напряжений феррорезонансных БНТ при отключении ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью. В фазе «А», после отключения ОЗЗ, возникает феррорезонансный переходной процесс с БНТ, у которого интеграл Джоуля по сравнению с феррорезонансным БНТ в сети с изолированной нейтралью гораздо меньше. По оциллограмме напряжения видно, что характер феррорезонанса ближе к апериодическому. Это соответствует соотношению активного сопротивления феррорезонансного контура и его волнового сопротивления:

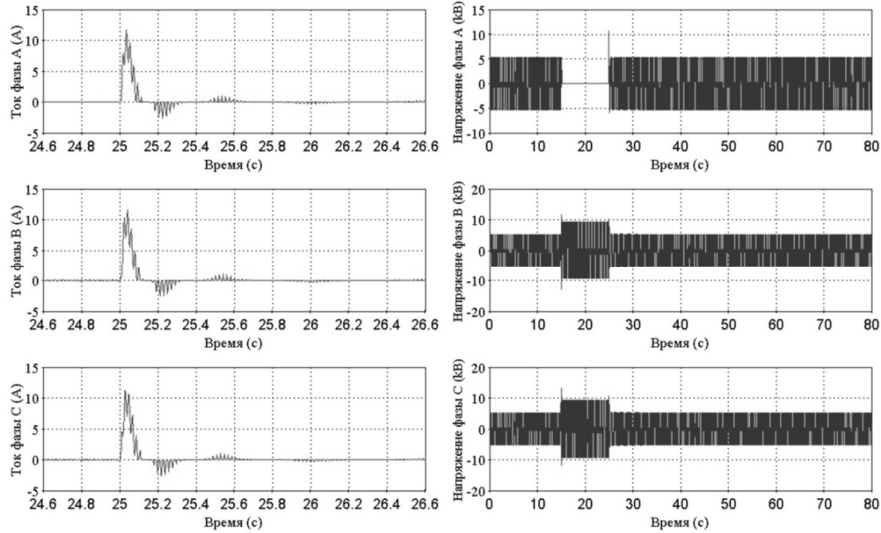
$$R \approx 2 \cdot \sqrt{L/C}, \tag{1}$$

где R – активное сопротивление контура, Ом; L – индуктивность намагничивания ТН, Гн [6]; C – электрическая емкость, Ф.

Используя данные расчетной модели, получим, Ом:

$$340 \approx 2 \cdot \sqrt{4,3/87 \cdot 10^{-6}} = 444.$$

Рис. 4. Расчётные осциллограммы напряжения и токов в первичной обмотке ТН



при ОЗЗ с ёмкостным током 300 А в сети с изолированной нейтралью

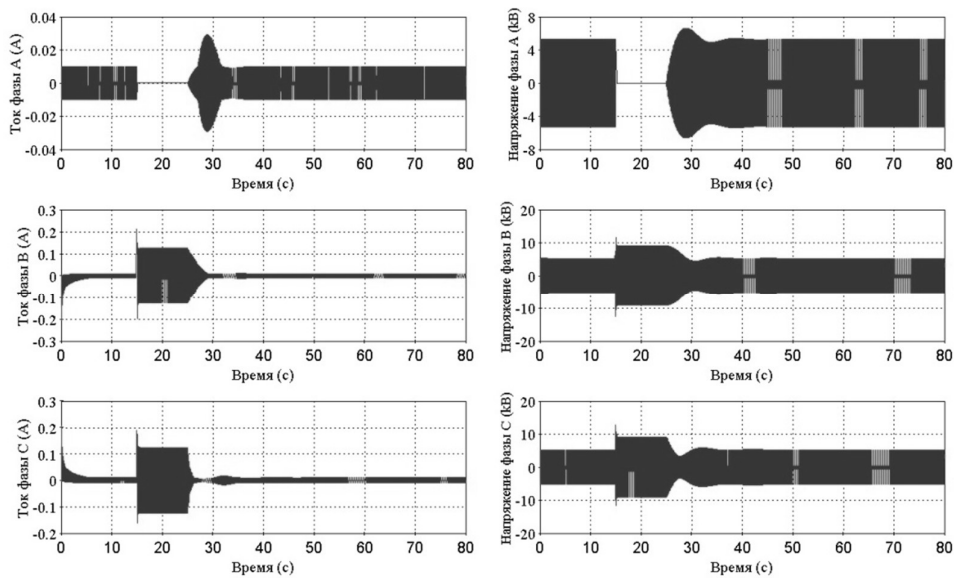


Рис 5. Расчётные осциллограммы напряжения и токов в первичной обмотке ТН при ОЗЗ с ёмкостным током 300 А в сети с компенсированной нейтралью

### Выводы

1) При ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью возникают феррорезонансные БНТ в ТН, обусловленные быстрым восстановлением напряжения на поврежденной фазе после отключения ОЗЗ, но их тепловое действие на первичную обмотку ТН многократно слабее теплового действия пусковых БНТ, что в отличие от сетей с изолированной нейтралью не может стать причиной повреждения ТН или сокращения их срока службы.

2) Увеличение ёмкостного тока в распределительной сети с 10 до 300 А существенно увеличивает опасность роста термического действия феррорезонанса на обмотку высшего напряжения ТН и не может быть причиной отказа ТН или сокращения его срока службы.

3) В дальнейших исследованиях следует проанализировать влияние недокомпенсации и перекомпенсации емкостных токов на параметры феррорезонансных переходных процессов в сетях с компенсированной нейтралью.

4) При дальнейших исследованиях феррорезонансных процессов целесообразно сравнить результаты представленных расчётов, полученных на основе модели ТН, использующей начальную кривую намагничивания, с результатами, полученными на основе моделей, использующих предельные и частные динамические петли гистерезиса.

### Библиографический список

1. Информационное сообщение ОРГРЭС, № Э-11/60.
2. **Нагорный, П.Д.** Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6-35 кВ / П.Д. Нагорный, В.В. Назаров // Промышленная энергетика. – 2002, № 3.
3. **Заболотников, А.П.** Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ / А.П. Заболотников, К.П. Кадомская, А.А Тихонов. - Новосибирск, 1993.
4. ПАСПОРТ Трансформатор напряжения НТМИ-6(10)-1- УХЛ2 Технические условия 3414-001-91941406-2011, Санкт-Петербург, 2012
5. **Кадомская, К.П.** Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография /К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008.
6. **Саенко, Ю. Л.** Исследование феррорезонансных процессов с учетом варьирования вебер-амперной характеристики трансформаторов напряжения / Ю. Л.Саенко, А.С.Попов // Электроенергетичні та електромеханічні системи: збірник наукових праць –Львів: Львівська політехніка. – 2012 –№ 736 – С.123-132.
7. **Поляков, В.С.** Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными ТН / В.С. Поляков // Энергоэксперт, №1, 2014
8. РД 34. 35. 305 Инструкция по проверке трансформаторов напряжения и их вторичных цепей // СПО Союзтехэнерго 1979 г.
9. **Колечицкая, Н.А.** Феррорезонансные явления на шинах подстанций 6–10 кВ / Н.А. Колечицкая, Н.С. Лазарев, Р.Н. Шульга, К.А. Змиева // Электротехника. - 2013. № 4.

Gusev O.Y., Gusev Y.P., Yuzhanin A.E.

## FERRORESONANCE PROCESSES CAUSED BY SINGLE-PHASE EARTH FAULTS IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH COMPENSATED NEUTRAL

National Research University «MPEI»

**Аннотация:** The article deals with the thermal effect of ferroresonance processes on the windings of voltage transformers during single-phase earth faults in distribution electrical networks with compensated neutral. The study was performed using the EMTP-RV software package (Powersys, France). The processes in the cores of the voltage transformer were analyzed on the basis of a mathematical model of the initial magnetization curves. It is established that the risk of damage to voltage transformers or shortening their service life under the influence of ferroresonance surges of magnetizing currents that occur when disconnecting single-phase earth faults in electric networks with compensated neutral is not significant, in contrast to networks with isolated neutral.

**Ключевые слова:** ferroresonance, distribution network with compensated neutral, voltage transformer, single-phase earth fault

### References

- [1] Information message of ORGRES, № E-11/60.
- [2] Nagorniy P. D., Nazarov V.V. “Izmeritelnie transformatori napryazheniya i control izolyatsii v setyah 6-35 kV [Measuring voltage transformers and insulation monitoring in 6-35 kV networks]”, Promishlennaya energetika [Industrial power engineering], 2002, № 3. (in Russian)
- [3] “Matematicheskoe modelirovanie i perenapryazheniya v electriceskikh setyah 6-35 kV [Mathematical modeling and overvoltage in electrical networks of 6 - 35 kV]” A. P. Zabolotnikov, K. P. Kadomskaya, A.A. Tihonov, Novosibirsk, 1993 (in Russian)
- [4] PASSPORT Voltage transformer NTMI-6 (10) - 1-UHL2 Technical specifications 3414-001-91941406-2011, St. Petersburg, 2012
- [5] “Electrooborudovanie visokogo napryazheniya novogo pokoleniya. Osnovnie harakteristiki i elektromagnitnie processy: monografiya [High-voltage electrical equipment of the new generation. Main characteristics and electromagnetic processes: monograph]” K. P. Kadomskaya, Yu. A. Lavrov, O. I. Laptev, Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2008
- [6] Saenko Y. L. “Issledovanie ferroresonansnih processov s uchetom varirovaniya veber-ampernih harakteristici transformatorov napryazheniya [Investigation of ferroresonance processes taking into account the variation of the weber-ampere characteristic of voltage transformers]”, Y. L. Saenko, A. S. Popov, Electric power and electromechanical systems: collection of scientific papers-Lviv: Lviv Polytechnic, 2012 –№ 736 – pp.123-132.
- [7] V. S. Polyakov “Usloviya vzniknoveniya i suschestvovaniya ferroresonansa v cepyah s eletromagnitnini izmeritelnimi TN [Conditions for the occurrence and existence of ferroresonance in circuits with electromagnetic measuring devices]”, Energoexpert [Energoexpert], 2014, №1
- [8] RD 34. 35. 305 Instructions for checking voltage transformers and their secondary circuits // SPO Soyuztekhenergo 1979.
- [9] “Ferroresonansnie yavleniya na shinah podstancii 6-10 kV [Ferroresonance phenomena on buses of 6-10 kV substations]”, Колечицкая Н.А., Лазарев Н.С., Шульга Р.Н., Змиева К.А, Electrotehnika [Electrical engineering], 2013, № 4

Р.Г. Исмятуллин, Д.О. Бунаков, И.В. Шкляев

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЙСК ЗА СЧЕТ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Тюменское высшее военно-инженерное командное училище  
им. маршала инженерных войск А. И. Прошлякова

**Аннотация:** В статье проведено обоснование возможности использования фотоэлектрических преобразователей в Вооружённых Силах Российской Федерации (ВС РФ) и их сравнение с зарубежными аналогами. Исследование акцентирует внимание на возможности использования фотоэлектрических преобразователей различных вариантов исполнения.

**Ключевые слова:** индивидуальные источники электроэнергии; групповые источники электроэнергии; солнечные панели; солнечная электростанция.

Ведение боевых действий связано с большими материальными затратами. Зачастую война ведётся с целью истощения ресурсов противника. При таком подходе любая возможность энергосберегающего функционирования войск является актуальной задачей. Поэтому «специфика военно-профессиональной деятельности офицеров ВС РФ и особенности их профессионального менталитета требуют разработки и внедрения специальных подходов в образовательный процесс, обеспечивающих формирование энергосберегающей направленности профессионального мышления офицеров» [1, с.134].

Одним из способов реализации энергоэффективного подхода является использование возобновляемых источников электрической энергии [2]. Все альтернативные возобновляемые источники электрической энергии с точки зрения их характеристик и возможностей можно разделить на две группы – межвидового применения и специального назначения. Первая группа решает задачи электропитания во всех воинских формированиях, вне зависимости от принадлежности. Такие источники имеют систематизацию по выходным параметрам, условиям эксплуатации и обслуживанию. Межвидовые альтернативные возобновляемые источники систематизированы в типоразмерные ряды.

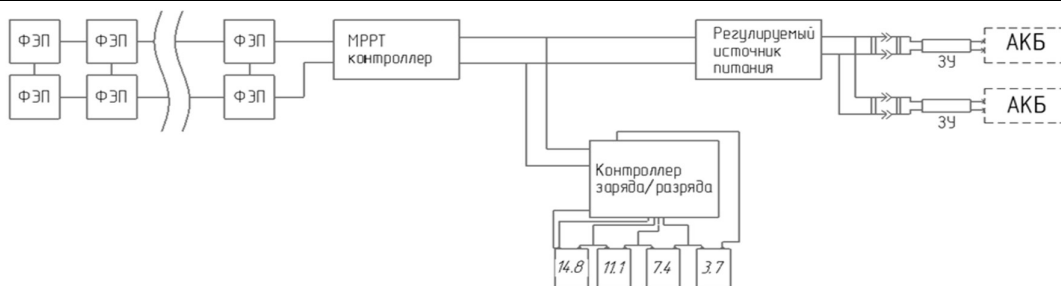
Вторая группа разрабатывается и используется для энергообеспечения образцов вооружения, военной и специальной техники, воинских формирований и автономных военных объектов с учетом специфики их функционирования. Системы имеют широкий спектр исполнения, а их характеристики разнообразны. Систематизация изделий осуществляется в малых типоразмерных рядах, определяемых спецификой задач потребителя.

Полагаем, что в этой связи большое значение приобретает научное обоснование приоритетов прорывных технологий и технологий двойного назначения, разрабатываемых в различных отраслях отечественной промышленности [3].

Важно и то, что «сейчас деятельность мировых лидеров современной энергетики характеризуется последовательной реализацией стратегий освоения передовых научно-технических достижений, направленных на энерго- и ресурсосбережение» [4, с. 121].

В системах электроснабжения войск к автономным возобновляемым источникам межвидового использования относятся солнечные энергетические системы, ветрогенераторы, микро-ГЭС и электрохимические генераторы [5]. Эти источники делятся на индивидуальные и групповые. Солнечные источники электрической энергии могут иметь большой спектр исполнения: зарядные солнечные устройства; однокорпусные или модульные переносные и мобильные фотоэлектростанции; стационарные или мобильные комбинированные энергоустановки; стационарные автономные или сетевые солнечные электростанции.

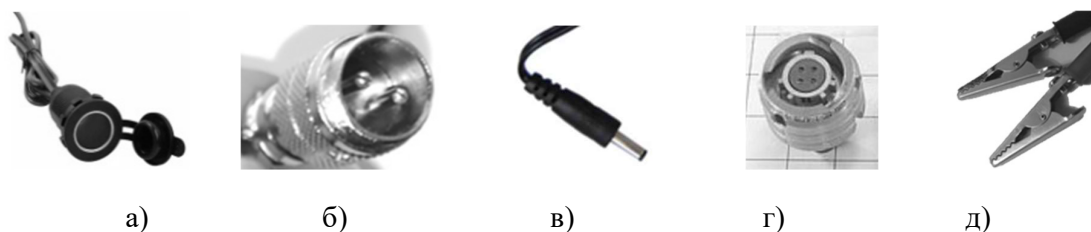
Среди индивидуальных источников энергии можно выделить две инициативные опытно-конструкторские работы по серийному производству межвидовых автономных возобновляемых источников. В первом случае система представляет собой мобильное компактное солнечное зарядное устройство с фотоэлектросистемой в виде раскладной солнечной батареи. Производится индивидуальный источник электроэнергии (ИИЭЭ) в трех исполнениях – мощностью в 30, 50 и 100 Вт. В ВС РФ данные ИИЭЭ используются, в том числе для подзарядки аккумуляторных батарей и элементов питания, входящих в состав комплектов ОВР-3Ш и ОВР-2.02. Недостатком данных устройств является то, что у них отсутствуют специальные штекеры для подключения различных подзаряжаемых элементов питания. Для устранения данной проблемы в составе рассматриваемых комплектов предлагается использовать устройства на фотоэлектрических преобразователях энергии, разработанных специально для зарядки аккумуляторов из комплектов ОВР-3Ш и ОВР-2.02. Так, на кафедре электроснабжения и радиотелемеханики Тюменского высшего военно-инженерного командного училища (ТВВИКУ) было сконструировано устройство для заряда АКБ, состоящее из двух модулей: первый – модуль фотоэлектрической системы, включающий в себя солнечные фотоэлементы, МРРТ (Maximum Power Point Tracking) контроллер, регулируемый источник питания для ограничения тока заряда; второй – модуль накопителей электроэнергии, содержащий контроллер заряда/разряда BMS (Battery Management System), четыре последовательно соединенных литий-полимерных аккумулятора. Функциональная схема модульного зарядного устройства представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Функциональная схема модульного зарядного устройства:**

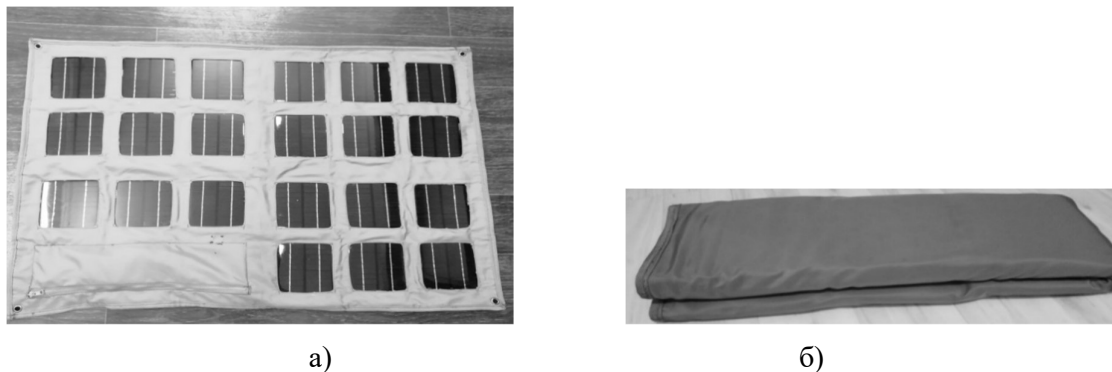
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;  
ЗУ – зарядное устройство, идущее в комплекте с АКБ

Для возможности использования специальных штекеров, предусмотренных в комплектах разминирования, были смонтированы специальные разъемы: на 12 В DC (рис. 2,а); на 16,8В DC (рис. 2,б); на 4,2 В DC (рис. 2,в); на 12 В DC для различных средств поиска (рис. 2,г), для нестандартных АКБ предусмотрены специальные зажимные контакты типа «крокодил» (рис. 2,д).



**Рис. 2. Разъемы в разработанном модульном зарядном устройстве**

Модуль фотоэлектрической системы выполнен в едином непромокаемом корпусе-чехле (рис. 3).



**Рис. 3. Модуль фотоэлектрической системы:**

а – в развернутом виде; б – в свернутом виде

Следует заметить, что устройство гарантированно вырабатывает необходимую для заряда мощность даже в условиях недостаточной освещенности. Это позволяет использовать устройство в кустах и кронах деревьев, тем самым не создавая блики на солнце и не демаскируя расположение военнослужащих на местности.



Модуль накопителей электроэнергии позволяет использовать данное зарядное устройство не только днем, но и ночью. Разделение модульного индивидуального источника электроэнергии позволяет в летний период располагать накопители в естественной или искусственно созданной тени, а в зимний период, когда модуль фотоэлектрической системы расположен на открытом воздухе, накопители могут находиться в помещении с более высокой температурой, что позволяет сохранить эффективность заряда и увеличить срок службы накопителей.

Для совершенствования изделия была создана конструкция крепления модуля фотоэлектрической системы (рис. 4), которая позволяет устанавливать его на все виды поверхностей, в том числе и вертикальные, а также регулировать угол наклона для того чтобы увеличить интенсивность светового потока падающих солнечных лучей. Дополнительным преимуществом данной конструкции является осуществимость эффективного охлаждения устройства, благодаря неплотному прилеганию его к земной поверхности, а также возможность расположения модуля накопителей электроэнергии в тени модуля фотоэлектрической системы.



**Рис. 4. Модуль фотоэлектрической системы, размещённый на земле на колышках:**  
а - вид сверху; б – вид сбоку

Групповые источники электроэнергии (ГИЭЭ) представляют собой полный цикл операций по выработке, накоплению и преобразованию энергии. В качестве генерирующих мощностей выступают раскладные солнечные батареи. В роли накопителей энергии в групповом источнике применяются аккумуляторы, изготовленные по литий-ионной технологии. Накопители энергии из состава групповых источников контролируются электронными блоками с элементами интеллектуального управления зарядом, накоплением и расходом, что позволяет осуществлять операции без участия человека.

На кафедре электроснабжения и радиотелемеханики ТВВИКУ рассматривается возможность использования для военных городков стационарных альтернативных источников электрической энергии, использующих солнечное излучение. Для этого был разработан и установлен стационарный источник электрической энергии мощностью 3 кВт (рис. 5), состоящий из двух основных элементов:

рамы с закрепленными на ней солнечными панелями и силового шкафа с солнечным контроллером, аккумулятором и инвертором.



**Рис. 5. Стационарный групповой источник электрической энергии**

Следует заметить, что при создании данного источника электрической энергии в качестве основных элементов использовались комплектующие российского производства. Солнечные панели произведены на заводе ООО «ХЕВЕЛ» в г. Новочебоксарск. Инвертор и солнечный контроллер изготовлены инновационной компанией "А-электроника", г. Новосибирск. Аккумуляторная батарея изготовлена на Тюменском аккумуляторном заводе.

Интересным является проект применения плавающих солнечных электростанций для электроснабжения военных городков американской армии на примере крупнейшей военной базы в Форт-Брэгге (Северная Каролина), суммарная мощность которой составляет 1,1 МВт. Установка солнечных панелей в водоеме выгодна тем, что на поверхности воды почти полностью отсутствует тень, они не занимают большие площади земли, пригодной для различных нужд, а также вода является своего рода системой охлаждения фотоэлектрических преобразователей, что существенно повышает их эффективность.

Направлением дальнейших перспективных исследований кафедры является разработка группового передвижного источника электрической энергии с фотоэлектрическими преобразователями на базе электростанции ЭСБ-4-ВПО, которая будет позволять осуществлять питание потребителей от агрегата во время максимальной потребляемой мощности, или от солнечных панелей в то время, когда нагрузка меньше или равна мощности, отдаваемой фотоэлектрическими преобразователями.

Также на кафедре ведутся разработки по проектированию совершенно новой солнечной электростанции, перевозимой в прицепе или на отдельном автомобиле. При этом предполагается учесть опыт, полученный при создании известной гибридной электростанции СГДЭАС-30.

Таким образом, в ВС РФ имеется множество перспективных разработок и накоплен значительный опыт по использованию солнечной энергии с целью электроснабжения войск.

**Библиографический список**

1. **Голубцов, Н.В.** Формирование профессионального мышления энергосберегающей направленности в системе высшего профессионального образования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – №2. – С. 130-134.
2. **Федоров, О.В.** Ресурсная направленность инженерной деятельности в инновационной сфере: монография / О.В. Федоров. - М.: КноРус, 2019. 130 с.
3. **Федоров, О.В.** Отраслевые аспекты инновационной деятельности: учеб. пособие / О.В. Федоров. - М.: КноРус, 2020. 142 с.
4. **Голубцов, Н. В.** Управление инновациями в энергетике: проблема подготовки кадров // Экономическое возрождение России. – 2010. – №3(25). – С. 121-126.
5. Автономные возобновляемые источники электрической энергии. Инженерный журнал. №4, 2018. – М.: УНИВ, 2018. – С. 36-39

**R.G. Ismyatullin, D.O. Bunakov, I. V. Shklyayev**

**INNOVATIVE APPROACHES TO INCREASE  
EFFICIENCY OF POWER SUPPLY TO THE TROOPS  
BY SOLAR BATTERIES**

Tyumen Higher Military Engineering Command School  
them. Marshal of the Engineering Troops A.I. Proshlyakov

**Abstract:** The article substantiates the possibility of using photovoltaic converters in the Armed Forces of the Russian Federation and compares them with foreign analogues. The study focuses on the possibility of using photovoltaic converters of various versions.

**Key words:** individual power sources; group power sources; solar panels; solar power plant.

**References**

- [1] N.V. Golubtsov, “Formirovaniye professional'nogo myshleniya energosberegayushchey napravlennosti v sisteme vysshego professional'nogo obrazovaniya [Formation of professional thinking of energy-saving orientation in the system of higher professional education]”, *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International Journal of Applied and Fundamental Research]*, no. 2, pp. 130-134, 2012 (in Russian)
- [2] O.V. Fedorov, “Resursnaya napravlennost' inzhenernoy deyatel'nosti v innovatsionnoy sfere: monografiya [Resource orientation of engineering activity in the innovation sphere: monograph]”, Moscow, pp. 130, 2019 (in Russian)
- [3] O.V. Fedorov, “Otraslevyye aspekty innovatsionnoy deyatel'nosti: ucheb. Posobiye [Sectoral aspects of innovation: textbook. allowance]”, Moscow, pp. 142, 2020
- [4] N.V. Golubtsov “Upravleniye innovatsiyami v energetike: problema podgotovki kadrov [Management of innovations in the energy sector: the problem of personnel training]”, *Ekonomicheskoye vrozhdeniye Rossii [Economic revival of Russia]*, no. 3(25), pp. 121-126, 2010 (in Russian)
- [5] “Autonomous renewable sources of electrical energy”, *Engineering journal*, Moscow, no. 4, pp. 36-39, 2018 (in Russian)

УДК 620.92

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_353

А.П. Корнеев

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Белорусско-Российский университет

**Аннотация:** Энергетическое сотрудничество является важной основой и поддержкой инициативы «Один пояс, один путь». Россия, крупнейшая энергетическая страна Евразии, занимает в ней важное стратегическое положение. В последние годы Россия рассматривает энергоэффективность, энергосбережение и сокращение выбросов, а также развитие возобновляемых источников энергии. Анализируется развитие возобновляемой энергетики в России и формулируются текущие меры по возобновляемым источникам энергии.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергия, устойчивое развитие, энергетическая структура, "Один пояс, один путь".

### Введение

В связи с чрезмерным потреблением традиционных ископаемых источников энергии, таких как нефть, природный газ и уголь, и возрастающим негативным воздействием на окружающую среду, страны всего мира начали обращать внимание на развитие и использование возобновляемых источников энергии. Доходы России от нефти и газа в 2015 году составили более 43% доходов федерального бюджета, подтверждая тем самым ресурсозависимость её экономики.

Однако в процессе экономического развития экологические издержки, такие как выбросы углерода, относительно высоки. Проблемы загрязнения окружающей среды более серьезны. Кроме того, как крупный производитель и экспортер энергоносителей, Россия имеет огромное влияние на мировой энергетический рынок и международный политический ландшафт, а экспорт энергоносителей также является одним из ее важных средств для получения международного голоса. Таким образом, энергетика занимает чрезвычайно важное стратегическое положение во внутренней политической и экономической жизни России, а также в международной дипломатии.

В последние годы, чтобы лучше защищать окружающую среду, создавать возможности для трудоустройства и улучшать условия жизни людей внутри страны, а также более эффективно реагировать на воздействие глобальной энергетической революции за пределами страны, Россия начала проводить политику поддержки развития возобновляемых источников энергии.

### Распределение энергии в России

Что касается запасов энергии, Россия обладает чрезвычайно богатыми запасами ископаемой энергии. Общие запасы природного газа составляют 127 трлн куб. м, что составляет треть мировых запасов; общие запасы нефти

составляют около 44 Гт, что составляет 10% от общих мировых запасов; а запасы угля превышают 200 Гт, что составляет 12% от общих мировых запасов. Кроме того, российские запасы урана также составляют 14% мировых. С точки зрения общего энергопотребления, общее потребление первичной энергии в России в 2016 году составило 673,9 млн т нефтяного эквивалента, что составляет 5,1% от общего мирового потребления энергии. С точки зрения структуры потребления энергии, потребление ископаемых энергоресурсов составляет подавляющее большинство (из которых на природный газ приходится 52,20%, на нефть 21,96% и на уголь 12,95%). Ядерная энергетика также имеет хорошее развитие (6,60%). Развитие и использование природного газа, ядерной энергии и относительно большого количества гидроэнергии (6,26%) в определенной степени демонстрируют аспект «чистой и низкоуглеродистой» структуры энергетике [1].

### Состояние возобновляемой энергетике в России

С точки зрения производства энергии, энергия биомассы и гидроэнергетика являются основными возобновляемыми источниками энергии в энергосистеме России. В 2018 году установленная мощность возобновляемых источников энергии составила 51 350 МВт, из которых установленная мощность гидроэлектростанций составила 51 318 МВт, что составляет 99,9% от общей; большая часть установленной гидроэлектростанции была крупной (более 10 МВт), достигнув 49 667 МВт. На его долю приходится 96,8% от общей установленной мощности гидроэлектростанций. Что касается потребления энергии, за исключением гидроэнергетики, потребление других возобновляемых источников энергии в 2017 и 2018 годах составило 0,2 млн т нефтяного эквивалента. Будучи третьим по величине потребителем энергии в мире после Китая и США, по сравнению с его годовым потреблением первичной энергии в 673,9 млн т нефтяного эквивалента (2016 г.), потребление других возобновляемых источников энергии, за исключением гидроэнергетики, почти ничтожно.

Россия богата гидроресурсами: со средним годовым количеством осадков 600-800 мм, общим среднегодовым количеством осадков 9 347 км<sup>3</sup> и средним общим стоком 6 242 км<sup>3</sup> она имеет вторые в мире гидроэнергетические ресурсы. Как показано в табл. 1, теоретические общие запасы гидроэнергии в России составляют 2395,1 ТВт · ч / год, а технологически разрабатываемый объем составляет 1670,2 ТВт · ч / год, что является экономически разрабатываемым. Сумма составляет 852,4 ТВт · ч / год.

Пока освоено лишь около 10% от технологически освоенного объема и 18,8% от экономически развиваемого. По состоянию на конец 2013 года совокупная установленная мощность гидроэлектростанций в России достигла 50,75 ГВт и, как ожидается, достигнет 56,23 ГВт в 2025 году со среднегодовыми темпами роста 0,9% [2].

Укрепляя независимое развитие гидроэнергетики, Россия также осуществляет широкое международное сотрудничество. Андалузская электроэнергетическая компания и Всемирный фонд дикой природы (WWF) всесторонне изучили влияние строительства гидроэлектростанций на востоке России на окружающую среду и изучили проекты с минимальным воздействием на окружающую среду и чрезвычайно высокими социальными и экономическими преимуществами. В

2014 году Россия достигла соглашения с China Three Gorges Group (CTG) и China Power Construction Group о разработке гидроэнергетических проектов с функциями защиты от наводнений и гидроаккумуляции в России. В том же году было достигнуто соглашение о сотрудничестве с China Power Construction Corporation для начала строительства Ленинградской гидроаккумулирующей электростанции установленной мощностью 1560 МВт [3].

Развитие ветроэнергетики в России имеет уникальные факторы. Россия обладает большой территорией и богатыми ветровыми ресурсами. По оценкам, экономический потенциал России в области ветроэнергетики составляет от 200 до 300 млрд кВт · ч / год. Поскольку нефтегазовые ресурсы России расположены в относительно узкой и концентрированной области, а транспортные расходы высоки, энергия ветра стала одним из важных способов решения проблем энергоснабжения.

Однако установленная мощность ветроэнергетики в России поддерживалась на уровне 10 МВт, и только в 2015 году она достигла прорыва, увеличившись до 110 МВт и выработав 6 ГВт · ч в 2016 году. Россия разрабатывает и внедряет серии проектов ветроэнергетики (ВЭС) с установленной мощностью от 100 до 300 МВт. В случае успешной реализации этих проектов установленная мощность ветроэнергетики резко возрастает. Однако, несмотря на хороший план, развитие ветроэнергетических проектов в России в краткосрочной перспективе все еще идет медленно.

Что касается исследований и разработок в области ветроэнергетики, то уже в 1930-х годах Россия стала первой страной в мире, которая построила ветряные турбины промышленного масштаба. В 1995 году в России было разработано вертикально-осевое ветроэнергетическое оборудование мощностью 250 кВт. Однако из-за отсутствия спроса на ветровую энергию общая установленная мощность ветровой энергии не увеличилась. Поскольку страны во всем мире уделяют все больше внимания развитию ветроэнергетики, в последние годы начали активно разрабатывать ветроэнергетические проекты и разрабатывать ветроэнергетическое оборудование, такое как новые ветряные турбины с высоким крутящим моментом и небольшие мобильные ветряные турбины.

Россия, обладая самой большой площадью суши в мире, имеет уникальное преимущество в развитии солнечной энергетики. Даже если только 30% территории страны можно будет эффективно использовать, потенциал для производства солнечной энергии по-прежнему огромен, а перспективы ее применения довольно широки. Однако, поскольку стоимость разработки и использования солнечной энергии на 50% выше, чем у ископаемой энергии, если баланс между ценой и качеством будет найден за счет политики и технологий, что может снизить затраты при обеспечении эффективности, солнечная энергия будет обязательно находиться в системе энергоснабжения России [4].

С 2012 года использование солнечной энергетики в России значительно расширилась. С одной стороны, ускорилось строительство местных солнечных электростанций. В августе 2012 года Россия приняла решение о строительстве

солнечной электростанции установленной мощностью 100 МВт в Челябинской области. При этом через тендерный механизм отбора проектов планировалось выдать на общую сумму около 160 млрд рублей. Субсидии на производство солнечной энергии. По состоянию на конец 2016 года установленная мощность солнечных батарей в России достигла 540 МВт, а к 2020 году ожидается, что она достигнет 2 000 МВт. С другой стороны, Россия также активно стремится к международному сотрудничеству в строительстве солнечных электростанций. В 2012 году компания ЛУКОЙЛ запустила проект солнечной энергетике в Узбекистане с общим объемом инвестиций около 250 млн евро, включая производство солнечной энергии с установленной мощностью 100 МВт [5].

Кроме того, полностью запущена геотермальная электростанция на острове Кунаширо (один из южных Курильских островов), которая использует давление пара вулкана Менделеева для выработки электроэнергии. Подсчитано, что электростанция может сократить потребление более 4 000 тонн дизельного топлива или от 7 000 до 10 000 тонн угля в год. Россия также планирует построить геотермальную электростанцию мощностью 30 МВт на Зетре (один из Южных Курильских островов).

Прочная сельскохозяйственная база России и богатые лесные ресурсы дают ей огромный потенциал для производства топлива из биомассы, но он еще не полностью использован. В настоящее время Китай и Россия совместно строят завод по производству этанола в Омске. В июне 2011 года Китай и Россия подписали рамочное соглашение о сотрудничестве в области биомассы. В мае 2013 года было издано постановление правительства, которое установило механизм содействия развитию возобновляемых источников энергии, но исключило производство энергии из биомассы и биогаза. Из-за отсутствия соответствующей политики стимулирования запланированное строительство электростанции на биомассе мощностью 580 МВт и биогазовой электростанции мощностью 330 МВт до 2020 года может не быть завершено. Эксперты полагают, что большинство электростанций, работающих на биомассе и биогазе, расположены за пределами зоны покрытия энергосистемы, а установленная мощность меньше, чем масштабы промышленного производства, поэтому на этот раз не было выпущено никаких соответствующих стимулирующих политик. Это электростанции, работающие на биомассе и биогазе, могут получать ценовые субсидии на розничном рынке после получения квалификационного сертификата на конкурсной основе. Однако маловероятно, что крупномасштабные электростанции, работающие на биомассе и биогазе, будут созданы до 2025 года [6].

### **Трудности развития возобновляемой энергетике в России**

Превосходные природные ресурсы России полностью оборудованы для развития возобновляемых источников энергии и демонстрируют региональное разнообразие. Экономически выгодное количество возобновляемой энергии в России превышает 2,7 триллиона тонн стандартного угля, и существует огромный потенциал развития. Энергия ветра и солнца может поставлять электроэнергию в удаленные районы, недоступные для электросети; обширные леса и



пахотные земли могут обеспечить энергию биомассы; Северный Кавказ и полуостров Камчатка могут использовать геотермальную энергию; восточная часть устья реки, Белое и Охотское моря. Может развивать приливную выработку энергии. С другой стороны, в России есть уникальные условия для развития смешанных поставок возобновляемой энергии и электроэнергии. Однако нефтегазовые ресурсы России всегда были в выгодном положении, и ее бюджетные доходы сильно зависят от экспорта энергоносителей из нефти и газа. Достаточное и дешевое предложение ископаемой энергии делает развитие возобновляемых источников энергии недостаточным. Кроме того, цены на энергоносители и налоги в России значительно ниже, чем в большинстве стран мира, а цена на бензин составляет всего 0,5%. Такие низкие цены на нефть и газ, составляющие около 68 долларов США за литр (август 2017 г.), затрудняют формирование ценового преимущества возобновляемыми источниками энергии, а также усложняют разработку государственной фискальной политики.

Наряду с напряженными отношениями между Россией и западными странами, изменения в международном энергетическом ландшафте оказали глубокое влияние на энергетическую стратегию России. Успех революции в сфере сланцевого газа в Соединенных Штатах сделал их крупнейшим производителем природного газа; производство природного газа увеличивалось из года в год, достигнув 749,2 млрд м<sup>3</sup> в 2016 году, что на 29,3% больше, чем в 579,4 млрд м<sup>3</sup> в России. Это снизит ожидания в отношении экспорта российского природного газа и, вероятно, вынудит Россию расширить внутренний спрос на газ.

### **Контрмеры и перспективы развития возобновляемых источников энергии**

Во-первых, необходимо разработать диверсифицированную модель, чтобы воспользоваться стратегической возможностью глобальной энергетической революции и способствовать трансформации внутренних структур производства и потребления энергии. Россия должна посвятить себя крупномасштабному развитию, диверсифицированному развитию, распределенному использованию возобновляемых источников энергии, а также производству оборудования и инфраструктуры. Технологические инновации на объектах и в других областях для достижения крупномасштабной, диверсифицированной и распределенной разработки и использования возобновляемых источников энергии снижают капиталовложения и затраты на использование, смягчая финансовое давление и повышая конкурентоспособность рынка возобновляемых источников энергии и производства оборудования для сокращения. Конкурентные недостатки традиционных ископаемых источников энергии занимают более выгодное положение в международной конкуренции и сотрудничестве благодаря обладанию независимыми правами интеллектуальной собственности.

Во-вторых, необходимо создать разумную политическую систему. На данном этапе возобновляемые источники энергии все еще являются отраслью, ориентированной на политику. Отсутствие систем, трудности в реализации

политики, дублирование содержания и противоречивые цели стали основными препятствиями, сдерживающими развитие возобновляемой энергетики в России. Россия постепенно осознала, что всестороннее развитие и использование возобновляемых источников энергии требует четкой и полной правовой базы и системы политики. В будущем ей следует продолжать обнародовать и совершенствовать соответствующие законы и нормативные акты, чтобы осознать рациональность и полноту конструкции системы для развития возобновляемых источников энергии.

В-третьих. Международное сотрудничество в области научных и технологических исследований и разработок может оптимизировать распределение ресурсов, способствовать дополнительным преимуществам, увеличить размер рынка, оптимизировать модели использования и снизить затраты на разработку. Россия должна в полной мере использовать международные агентства или механизмы сотрудничества, такие как Инициатива «Один пояс, один путь», БРИКС и Шанхайская организация сотрудничества, для укрепления стратегического сотрудничества с Китаем и другими странами. Более передовые технологии привлекают больше международных инвестиций. Кроме того, это также будет стимулировать большее количество отечественных энергетических компаний и капитала в области возобновляемых источников энергии, стремиться к международному сотрудничеству, расширять внутренние и внешние рынки и постепенно создавать механизмы и модели международного многостороннего сотрудничества для возобновляемых источников энергии.

### Выводы

Энергетическое сотрудничество является важной основой и поддержкой инициативы «Один пояс, один путь», а отрасль возобновляемых источников энергии, которая является низкоуглеродистой и экологически чистой, имеет огромные резервы и имеет большое промышленное значение, является важной отправной точкой для создания зеленой инициативы «Один пояс, один путь». В то же время инициатива «Один пояс, один путь» также обеспечивает эффективный механизм многостороннего сотрудничества для энергетического сотрудничества между странами, расположенными вдоль маршрута. На форуме по международному сотрудничеству «Один пояс, один путь», состоявшемся в мае 2017 года, Китай предложил воспользоваться новым витком реструктуризации энергетики и тенденциями реформирования энергетических технологий, создать глобальный энергетический Интернет и добиться зеленого и низкоуглеродного развития. России следует объединить передовые концепции, опыт развития и преимущества с потребностями стран, расположенных вдоль «пояса и пути», для создания системы возобновляемых источников энергии и предоставить соответствующим странам опыт в создании нормативно-правовой базы и формулировании политики, а также в технологиях возобновляемых источников энергии. Международное сотрудничество в производственных цепочках и демонстрационных проектах важно в таких областях, как исследования и разработки, обучение персонала, производство оборудования, хранение энергии и строительство

интеллектуальных сетей. Энергетические компании следует поощрять к планированию стратегий развития, выбору партнеров и интеграции развития с глобальной точки зрения.

#### Библиографический список

1. Kalogirou, S. A. Renewable energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(4), p.373-401.
2. Turner, & J., A. A realizable renewable energy future. 1999, p. 687-689.
3. Hepbasli, A. A key review on energetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 12(3), p. 593-661.
4. Christa Noël Brunnschweiler. Finance for renewable energy: an empirical analysis of developing and transition economies. CER-ETH Economics. working paper series, 2009, 15(3), p.241-274.
5. Koirala, A. Economic Growth and Renewable Energy among One Belt One Road Countries. (Doctoral dissertation), 2017.
6. Mattar, E. A. Machine Intelligence Based Living and Behavior Learning for Renewable Energy Management in Buildings. One Belt One Road Initiative, Renewable Energy Conference, 2017

---

**A.P. Korneev**

**ANALYSIS ON DEVELOPMENT PROSPECT OF RENEWABLE ENERGY  
POWER GENERATION IN RUSSIA**

Belarusian-Russian University

**Abstract:** Energy cooperation is an important foundation and support for the Belt and Road Initiative. Russia, the largest energy country in Eurasia, occupies an important strategic position in it. In recent years, Russia has been considering energy efficiency, energy conservation and emission reduction, as well as the development of renewable energy sources. The development of renewable energy in Russia is analyzed and current measures for renewable energy sources are formulated.

**Key words:** renewable energy, sustainable development, energy structure, "One Belt, One Road".

**References**

- [1] Kalogirou, S. A. Renewable energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(4), p.373-401.
- [2] Turner, & J., A. A realizable renewable energy future. 1999, p. 687-689.
- [3] Hepbasli, A. A key review on energetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 12(3), p. 593-661.
- [4] Christa Noël Brunnschweiler. Finance for renewable energy: an empirical analysis of developing and transition economies. CER-ETH Economics. working paper series, 2009, 15(3), p.241-274.
- [5] Koirala, A. Economic Growth and Renewable Energy among One Belt One Road Countries. (Doctoral dissertation), 2017.
- [6] Mattar, E. A. Machine Intelligence Based Living and Behavior Learning for Renewable Energy Management in Buildings. One Belt One Road Initiative, Renewable Energy Conference, 2017

Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа

## ПРОВЕДЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Томский политехнический университет

**Аннотация:** Большая протяженность распределительных сетей (электрическая удаленность нагрузки от централизованного источника питания) определяет увеличение уровня потерь мощности и уменьшение уровней напряжения на шинах нагрузки. Среди мероприятий, проводимых с целью нивелирования данного влияния, выделяют выполнение реконфигурации сети, установку объектов распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, а также устройств компенсации реактивной мощности. В статье приведены варианты решения обозначенной задачи на примере типовой 15-узловой IEEE схемы.

**Ключевые слова:** оптимизация, режим работы, реконфигурация, распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, критерии оптимизации.

Расширение распределительных сетей определяет необходимость проведения мероприятий по оптимизации режима работы электроэнергетической системы (ЭЭС).

Одним из таких мероприятий является выполнение реконфигурации [1], то есть определение в электрической сети новой топологии (линий связи) для обеспечения более рационального потокораспределения мощности в сети. В программной среде программного комплекса MATLAB осуществим реализацию алгоритма реконфигурации сети на примере типовой 15-узловой IEEE схемы, топология которой приведена на рис. 1, параметры – в [2], в предположении, что могут быть заменены всего пять из существующих связей.

При запуске программной реализации алгоритма реконфигурации была определена возможность введения следующих новых связей с сохранением радиальной топологии между шинами: новая ветвь 15 – между шинами 10 и 14, 16 – между шинами 5 и 9, 17 – между шинами 8 и 15, 18 – между шинами 7 и 12, 19 – между шинами 13 и 14; а также отключения следующих имеющихся связей: 4, 12, 13; и вновь введенных: 17 и 18. В результате чего потери сократились на 5,4% в сравнении с исходной схемой и составили 58,370 кВт.

Кроме того, мероприятием по оптимизации режима работы сети является локальная установка объекта распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3]. На языке программирования JavaScript на примере схемы рис. 1 осуществлена программная реализация алгоритма расчета перетоков и потерь мощности посредством применения итерационного метода для определения оптимальной конфигурации объекта РГ с учетом характера и степени влияния последнего на режимные параметры сети.

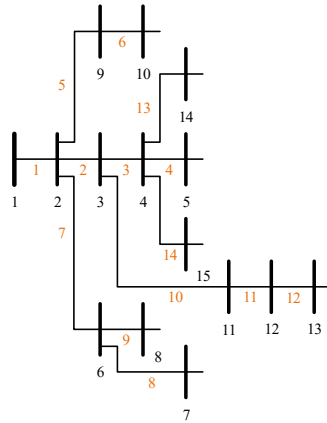


Рис. 1. Типовая 15-узловая IEEE схема

Для первого расчетного случая выполняется установка только одного объекта РГ (только на одну шину системы), при этом диапазон допустимых мощностей составляет  $0 \dots 2$  о.е. мощности нагрузки шины установки [4], шаг изменения мощности  $0,1$  о.е. мощности нагрузки шины установки.

При запуске алгоритма была выявлена следующая оптимальная конфигурация объекта РГ: 15 шина, мощность соответствует  $2$  о.е. мощности нагрузки 15 шины, то есть  $280$  кВт. В результате потери мощности сократились на  $20,5\%$  в сравнении с исходной схемой и составили  $49,091$  кВт.

Для второго реализованного расчетного случая предполагается возможность одновременной установки двух объектов РГ на разные шины, при этом ограничение на суммарную мощность устанавливаемых объектов, как и в первом случае, составляет  $0 \dots 2$  о.е. мощности нагрузки шины установки, шаг изменения мощности каждого объекта в рамках цикла  $0,1$  о.е. мощности нагрузки шины его размещения.

Результатом работы являлось решение об установке объектов РГ на 11 и 15 шины, при этом мощность обоих объектов соответствует  $1$  о.е. мощности нагрузки шины установки, то есть  $140$  кВт, и суммарно  $280$  кВт. Таким образом, потери мощности сократились на  $21,6\%$  и составили  $48,389$  кВт.

Так как специфика программной реализации определения оптимальной конфигурации объекта РГ, ввиду применения итерационного метода расчета потерь мощности, предполагает расчет относительных уровней напряжения шин и потокораспределения мощности в сети, приведем соответствующие данные для исходной схемы и обоих расчетных случаев в виде наглядного графического отображения (рис. 2 и рис.3 соответственно).

Согласно рис. 2, уровни напряжения всех шин схемы при установке объектов РГ оптимальной конфигурации выше, чем в исходной схеме. Кроме того, обеспечивается соответствие требованиям стандартов на допустимое отклонение уровней напряжения шин системы [5].

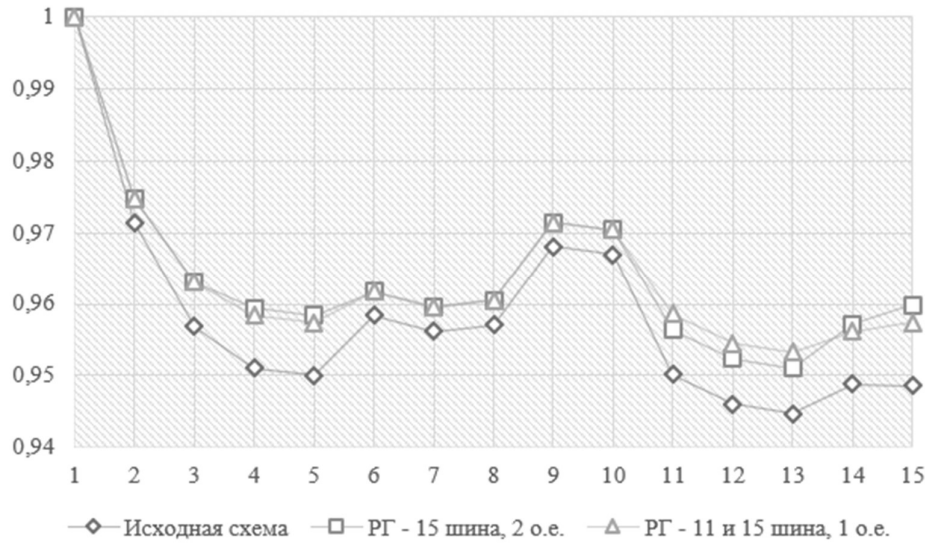


Рис. 2. Уровни напряжения типовой 15-узловой IEEE схемы

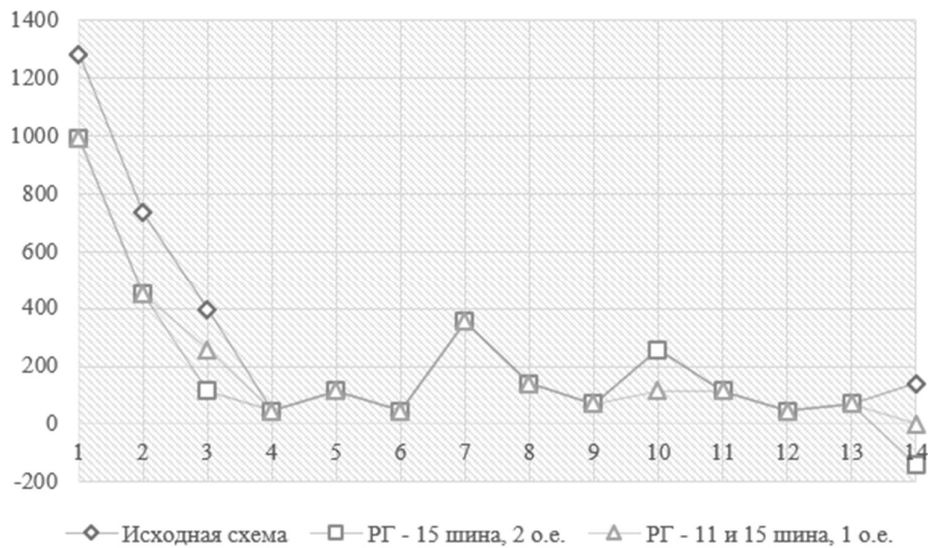


Рис. 3. Перетоки мощности типовой 15-узловой IEEE схемы

Согласно рис. 3, после установки объектов РГ наблюдается более рациональное потокораспределение мощности, чем в исходной схеме. Благодаря этому обеспечивается соответствие пропускной способности линий связи параметрам установленного оборудования, выбранного по условиям термической и динамической стойкости.

В контексте обозначенной задачи установка объектов РГ является более универсальным вариантом, чем проведение реконфигурации ввиду следующей причины. При формировании целевой функции расчетной части алгоритма определения оптимальной конфигурации внедряемого объекта РГ возможен учет

критериев оптимизации различной принадлежности той или иной предметной области. В частности:

- технические критерии – потери и перетоки активной и реактивной мощности, отклонение уровня напряжения шин системы от номинального значения, пропускная способность линий связи, надежность и качество электроснабжения потребителей;

- экономические – капитальные затраты на строительство 1 кВт установленной мощности объекта РГ, определяемые в соответствии с природой устанавливаемого объекта, в частности:

- дизельная электростанция;
- солнечная электростанция;
- ветряная электростанция;
- гибридная электростанция, включающая в себя как объекты на основе возобновляемых источников энергии (солнечные, ветряные электростанции и др.), так и на основе невозобновляемых источников энергии (дизельные электростанции и др.) для повышения энергоэффективности функционирования станции, стоимость 1 кВт потерь мощности, себестоимость 1 кВт ч потребления электроэнергии и др.;

- экологические – влияние функционирования объекта РГ на состояние экологической обстановки и др.

Таким образом, при изменении расчетных критериев или значений весовых коэффициентов, определяющих вклад каждого критерия в значение целевой функции, для одной и той же расчетной схемы возможно получение нескольких отличных друг от друга решений в соответствии с конкретными условиями задачи.

В соответствии с представленными экспериментальными результатами, полученными посредством расчета разработанными программными реализациями, можем заключить, что в настоящее время для оптимизации потокораспределения мощности в ЭЭС применяются такие мероприятия как реконфигурация сети и локальная установка объекта РГ в непосредственной близости от конечного потребителя. Данные методы позволяют сократить потери в исходной схеме и более рационально распределить потоки мощности от централизованного источника питания к потребителю электроэнергии. Кроме того, установлено, что интеграция объекта РГ в ЭЭС является более универсальным вариантом, чем реконфигурация, в связи с тем, что при формировании целевой функции первого возможен учет критериев оптимизации любой предметной области в том соотношении, в котором того требуют конкретные расчетные условия.



**Библиографический список**

1. Rao R.S. Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation / R.S. Rao, K. Ravindra, and S.V.L. Narasimham // IEEE Transactions on Power Systems, 2013. – vol. 28. – no. 1. – pp. 317-325.
2. Sughakar T.D. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab / T.D. Sughakar, M.R. Rajan, K.N. Srinivas, R.R. Prabu, T.V. Narmadha, and M.M. Krishnan // Indian Journal of Science and Technology, 2016. – vol. 9. – no. 12. – pp. 1-7.
3. Injeti S.K, Kumar N.P. A novel approach to identify optimal access point and capacity of multiple DGs in a small, medium and large scale radial distribution systems // International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013. – vol. 45. – no. 1. – pp. 142-151.
4. Karunarathne E. Optimal Placement and Sizing of DGs in Distribution Networks Using MLPSO Algorithm / E. Karunarathne, J. Pasupuleti, J. Ekanayake, and D. Almeida // Energies, 2020. – vol. 13. – no. 23. – pp. 1-25.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.

Ya.Yu. Malkova, R.A. Ufa

## OPTIMIZATION THE OPERATING MODE OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM

Tomsk Polytechnic University

**Abstract:** An increase of power losses and a decrease in voltage profile on the load buses since long spread of distribution networks (location of the load from the centralized power source) are determined. Among measures carried out to level this impact, rearrangement of the network, implementation of distributed generation, including those based on renewable energy sources, and also reactive power compensation devices are highlighted. In this article options for solving this problem on the 15-bus IEEE scheme are presented.

**Key words:** optimization, operating mode, rearrangement, distributed generation, renewable energy sources, indicators of optimization.

### References

- [1] Rao R.S. Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation / R.S. Rao, K. Ravindra, and S.V.L. Narasimham // IEEE Transactions on Power Systems, 2013. – vol. 28. – no. 1. – pp. 317-325.
- [2] Sughakar T.D. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab / T.D. Sughakar, M.R. Rajan, K.N. Srinivas, R.R. Prabu, T.V. Narmadha, and M.M. Krishnan // Indian Journal of Science and Technology, 2016. – vol. 9. – no. 12. – pp. 1-7.
- [3] Injeti S.K, Kumar N.P. A novel approach to identify optimal access point and capacity of multiple DGs in a small, medium and large scale radial distribution systems // International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013. – vol. 45. – no. 1. – pp. 142-151.
- [4] Karunarathne E. Optimal Placement and Sizing of DGs in Distribution Networks Using MLPSO Algorithm / E. Karunarathne, J. Pasupuleti, J. Ekanayake, and D. Almeida // Energies, 2020. – vol. 13. – no. 23. – pp. 1-25.
- [5] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Introduced Jul. 01, 2014. Moscow: Standartinform. GOST 32144-2013, pp. 15, 2013 (in Russian)

Н.А. Попкова, Е.М. Гецман

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены факторы, препятствующие внедрению возобновляемых источников энергии в электроэнергетическую систему Республики Беларусь. Проведен анализ графика работы энергосистемы с учетом состава генерирующего оборудования, выделены его особенности работы. Рассмотрена возможность увеличения доли ветроэнергетических установок в составе энергетической системы страны.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, электроэнергетическая система.

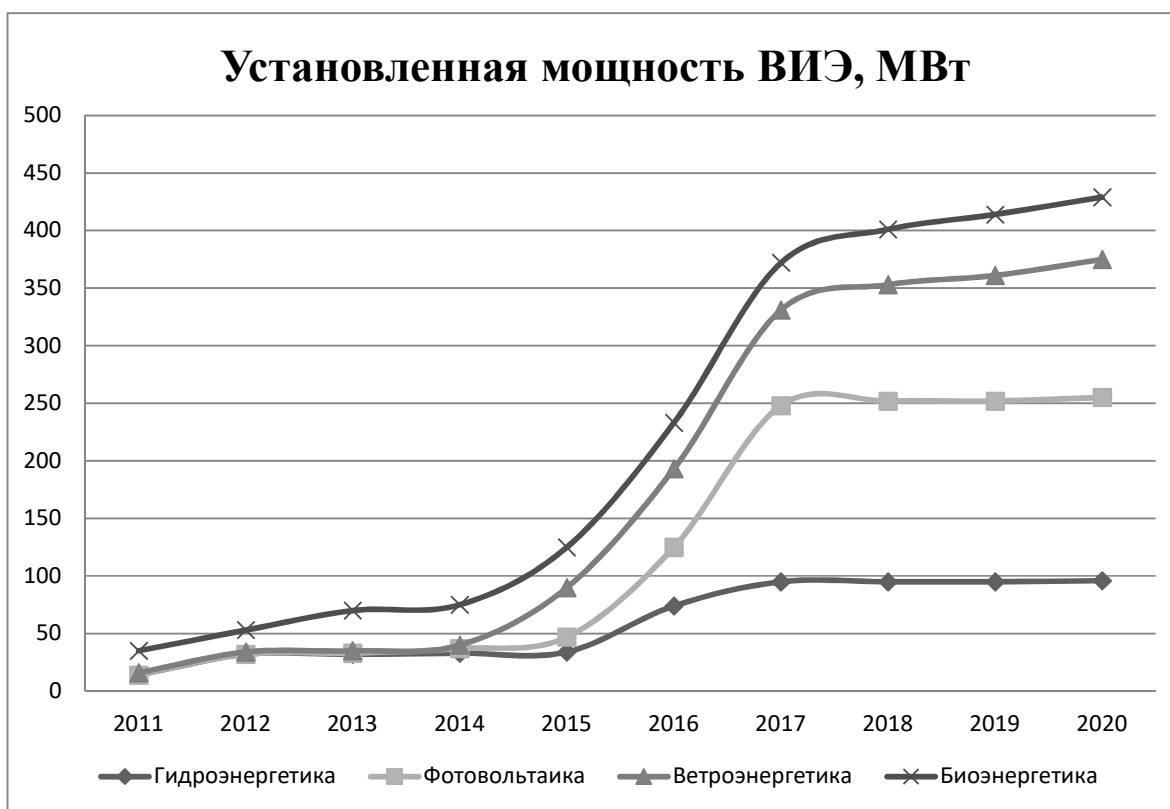
Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) для Республики Беларусь не только возможность достижения частичной энергетической независимости от стран-поставщиков основных энергетических ресурсов (природный газ, нефть), но и способ реального снижения объёма выбросов вредных и опасных для биосферы веществ в окружающую среду. Однако в настоящее время основным критерием, способствующим развитию ВИЭ на территории страны, является экономическая выгода от их использования.

После принятия 27 декабря 2010 года Закона Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии», который гарантировал приобретение государственными энергетическими снабжающими организациями всей предложенной поставщиками электрической энергии, произведенной из ВИЭ, по завышенным тарифам, количество установок, работающих на возобновляемых энергетических ресурсах возросло в разы [1]. В 2015 году в юридическую силу вступил Указ Президента Республики Беларусь №209 от 18.05.2015 «Об использовании возобновляемых источников энергии», который регулировал введение квот на создание установок по использованию ВИЭ, привлекая тем самым потенциальных инвесторов. Введённый пакет законодательных актов открыл новую эру в развитии использования альтернативных источников энергии на территории страны. На рис. 1 представлена динамика изменения установленной мощности генерирующих энергетических установок, работающих на ВИЭ.

В связи недостаточной мощностью солнечного потока на поверхность земли на территории Республики Беларусь, отсутствием приемлемого количества солнечных ясных дней, а также значительным количеством осадков,

развитие солнечной энергетики при современном развитии технологий является экономически невыгодным.

Внедрение гидроэнергетики на территории страны также не представляется эффективным в связи с падением уровня наземных вод, уменьшением стоков рек и заилением рек и водохранилищ. Эти изменения связывают с последствиями осушения болот в конце XX века, повышением среднемесячных температур на территории республики и уменьшением количества осадков в зимний период.



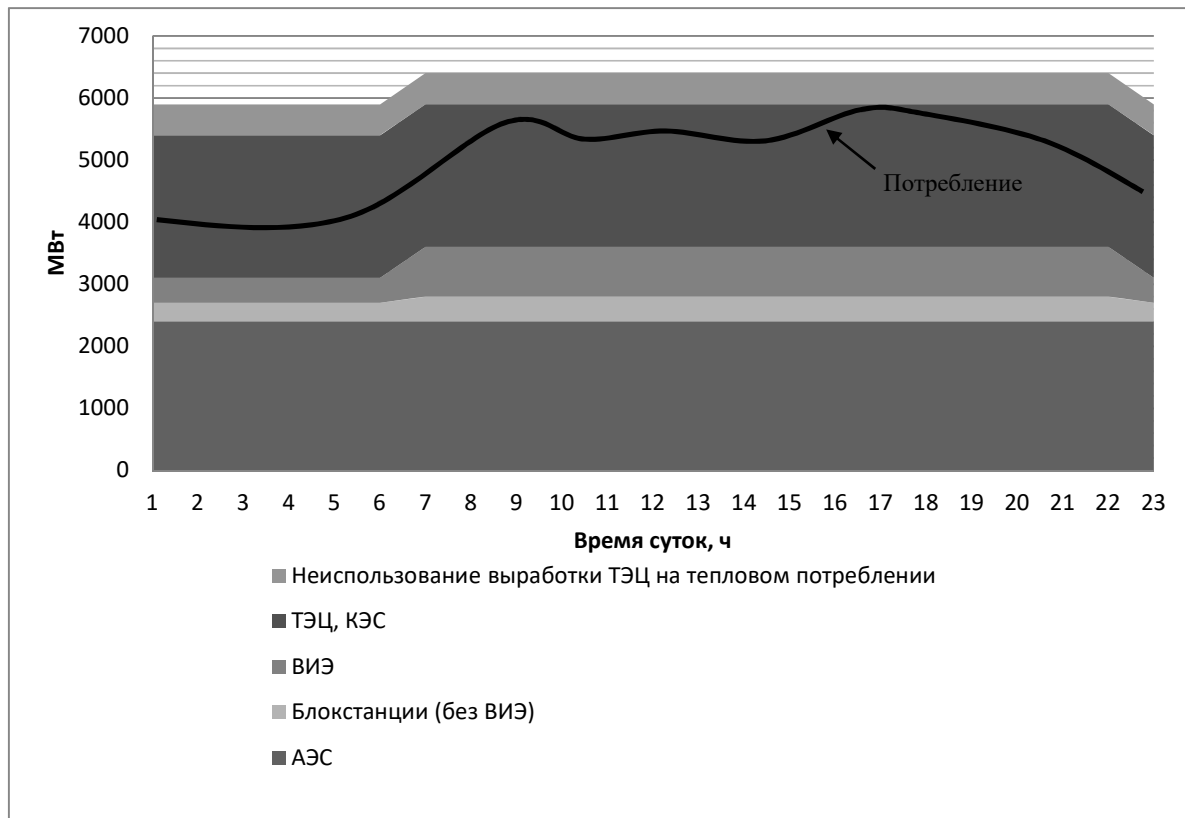
**Рис. 1. Динамика изменения установленной мощности ВИЭ в Республике Беларусь**

Биоэнергетика показывает впечатляющие показатели роста установленной мощности и получает широкое распространения во всех сферах народного и сельского хозяйства.

Одной из самых спорных технологий с точки зрения внедрения в энергосистему, применяемой сегодня в белорусской энергетике, является ветроэнергетика. С одной стороны, в Республике Беларусь есть существенный потенциал для развития ветроэнергетики [2], с другой стороны в стране пока что отсутствует возможность масштабной интеграции ветроэнергетических установок (ВЭУ) в электроэнергетическую систему. Подобная ситуация объясняется следующими факторами:

- неравномерность графика потребления электроэнергии в энергетической системе – разница между вечерним максимумом и ночным минимумом лежит в пределах 30..35%;

- большая доля базовых генерирующих узлов (рис.2);
- расхождение графиков требуемой работы ТЭЦ по тепловому графику с действительным графиком работы ТЭЦ;
- наличие резко переменного графика работы ВЭУ;
- невозможность полноценного использования ВЭУ для регулирования суточного графика нагрузки в настоящее время.
- регулирование частоты и напряжения в рамках энергосистем с наличием большого количества частных генерирующих мощностей на базе ВИЭ;
- комплектация энергосистемы накопителями энергии для компенсации неравномерного режима работы.



**Рис. 2. Распределение мощностей по видам генерирующих установок в суточном графике нагрузки работы белорусской энергосистемы**

Известно, что на территории Республики Беларусь установлено 108 ВЭУ, коэффициент установленной мощности которых в среднем составляет 32 % [3]. Установленная мощность всех ВЭУ, согласно данным рис. 1, составляет 120 МВт, с учетом среднего значения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) получаем среднее максимальное значение выработки в 38,4 МВт. Полученная цифра является недостижимой в реальной ситуации, так как для ее достижения необходимы идеальные условия ветрового потока во всех частях Беларуси одновременно. Учитывая максимальное потребление электрической

мощности в белорусской энергосистеме значением 6272 МВт (2020 г), реальная максимальная выдача мощности всех работающих ВЭУ на территории страны составляет лишь 0,06 % от потребляемой мощности энергосистемы. По меркам стран с развитой системой генерации, основанной на ВИЭ, подобное значение является несущественным.

Установки ВЭС негативно сказываются на работе релейной защиты (РЗ), так как установка ВЭУ непосредственно влияет на величину тока короткого замыкания, а в случае крупной доли ВЭУ в составе энергосистемы появляется проблема возникновения двунаправленного тока КЗ на питающих линиях. Решение указанных проблем в настоящее время ведется специализированными НИИ путем детализированного анализа натуральных эксплуатационных характеристик устройств РЗ.

Безусловно, для эффективного использования ВЭУ необходимо наличие гибкой энергетической системы, которая способна эффективно распределять потоки мощности и реализовать самостоятельную «балансировку», без вмешательства оперативного персонала. Под гибкостью системы в данном случае понимается обеспечиваемая автоматикой и защитой возможность энергетической системы реагировать на колебания и неясность соотношения баланса вырабатываемой и потребляемой электрической мощности, сохраняя исходные показатели надежности и стабильности работы [4].

Из рис.2 видно, что современный состав генерирующего оборудования энергетической системы Республики Беларусь не позволит производить эффективное резервирование с ВИЭ при полном сохранении действующего оборудования. Таким образом, для увеличения доли ВИЭ с резко переменным характером работы необходимо изменение структуры генерации эклектической мощности. Указанная цель может быть достигнута несколькими сценариями развития:

1. Увеличение потребления электрической энергии в стране. Реализовав данный пункт, можно добиться смещения графика потребления «вверх» (рис.2), тем самым можно добиться снижения доли базовой генерации, а получаемый потенциал выработки электроэнергии может покрываться за счет высокоманевренных энергетических ресурсов, в т.ч. газопоршневых установок. Достижение выравнивания графика нагрузки может достигаться путем смещения ночного максимума, а именно: масштабного перевода населения на электрическое отопление, однако в настоящее время данная возможность отсутствует в связи с низкой пропускной способностью распределительных линий электропередачи страны; распространения электрического транспорта - данный вопрос находится на начальном этапе развития (строятся зарядные станции и соответствующая инфраструктура).

2. Отказ от централизованной системы электроснабжения и переход к децентрализованной системе электроснабжения. В данном случае происходит замена менее маневренных и неэкономичных крупных ТЭС на более маневренные малые источники распределенной генерации, которые наравне с ВЭУ способны принимать участие в создании местного рынка электроэнергии.

Применение систем накопления энергии также позволит уменьшить негативные факторы влияния ВЭУ на режимные параметры работы энергосистемы в

целом. За последние 10 лет в энергосистеме Европейского союза не единожды проводились натурные испытания по длительной работе энергосистем с долей ВИЭ более 50 %, тем самым опровергая гипотезу о невозможности ведения режима системы с высокой долей ВИЭ в ее составе [5]. Опыт работы с ВИЭ других стран указывает на необходимость создания спотового рынка электроэнергии, который позволяет оперативно перераспределять электрическую мощность, создавать конкурентную среду для производителей электрической энергии [6].

Для более глубокой интеграции ВЭУ и других ВИЭ, характеризующиеся непостоянством выработки электрической энергии, энергетической системе Республики Беларусь необходимо:

- 1) обеспечить возможность горячего и холодного резервирования подобных установок высокоманевренными источниками энергии;
- 2) установить современные средства релейной защиты и автоматики, которые будут позволять эффективно управлять и своевременно реагировать на состояние системы;
- 3) перейти к системе децентрализации энергосистемы, позволив использовать источники распределённой генерации на равне с крупными энергетическими узлами;
- 4) выровнять график нагрузки энергосистемы, уменьшив разницу между максимум и минимум потребления.

#### Библиографический список

1. Закон Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии» от 27 декабря 2010 г. № 204-З [Электронный ресурс]. – URL: [https://kodeksy-by.com/zakon\\_rb\\_o\\_vozobnovlyaemyh\\_istochnikah\\_energii.htm](https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyaemyh_istochnikah_energii.htm) (дата обращения 20.04.2021).
2. Петруша Ю.С., Попкова Н.А. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-vetroenergetiki-v-respublike-belarus> (дата обращения: 26.04.2021).
3. Кадастр возобновляемых источников энергии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. – URL: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map> (дата обращения 20.04.2021).
4. Flexibility in the power systems. Group and technology research. [Электронный ресурс]. – URL: [www.dnv.com/publications/flexibility-in-the-power-system-103874](http://www.dnv.com/publications/flexibility-in-the-power-system-103874) (дата обращения 31.05.2021).
5. M. Milligan, K. Porter, Determining the capacity value of wind: an updated survey of methods and implementation, NREL/CP-500-43433, in: Paper for Presentation at the WindPower 2008, Houston, TX, USA, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2008.
6. **Кавешников, Н.Ю.** Развитие энергетического пространства европейского союза [Электронный ресурс] // Полит. наука. 2014. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-energeticheskogo-prostranstva-evropeyskogo-soyuza> (дата обращения: 23.04.2021).

N.A. Papkova, K.M. Hetsman

**ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE POSSIBILITY OF  
INTRODUCING WIND POWER PLANTS INTO THE ELECTRIC POWER  
SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

Belarussian national technical university

**Abstract:** The article considers the factors that prevent the introduction of renewable energy sources in the electric power system of the Republic of Belarus. The analysis of the schedule of the power system with consideration to the composition of the generating equipment is carried out, its features of operation are highlighted. The possibility of increasing the share of wind power plants in the country's energy system is considered.

**Key words:** renewable energy sources, wind power plants, electric power system

**References**

- [1] Law of the Republic of Belarus "On Renewable Energy Sources" Dec. 27, 2010 No. 204-Z [Online]. Available at: [https://kodeksy-by.com/zakon\\_rb\\_o\\_vozobnovlyaemyh\\_istochnikah\\_energii.htm](https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyaemyh_istochnikah_energii.htm) (Accessed: Apr. 20, 2021).
- [2] Petrusha Y.S., Papkova N.A. The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. pp. 124-134, 2019;62(2) (in Russian)
- [3] Cadastre of Renewable Energy Sources of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus. [Online]. Available at: URL: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map> (Accessed: Apr. 23, 2021).
- [4] Flexibility in the power systems. Group and technology research. [Online]. Available at: URL: [www.dnv.com/publications/flexibility-in-the-power-system-103874](http://www.dnv.com/publications/flexibility-in-the-power-system-103874) (Accessed: June 31, 2021).
- [4] M. Milligan, K. Porter, Determining the capacity value of wind: an updated survey of methods and implementation, NREL/CP-500-43433, in: Paper for Presentation at the WindPower 2008, Houston, TX, USA, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2008.
- [5] Kaveshnikov Nikolay Yuryevich Razvitie energeticheskogo prostranstva evropeyskogo soyuza [Development of the energy space of the European Union]. the science. 2014. №2 [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-energeticheskogo-prostranstva-evropeyskogo-soyuza> (Accessed: Apr. 23, 2021).



УДК 621.314.5

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_373

Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов

## ТЕХНОЛОГИЯ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Уфимский государственный авиационный технический университет

**Аннотация:** С быстрым развитием силовой электроники в эксплуатацию вводится все больше электростанций на основе ВИЭ с применением силовых электронных устройств (инверторов). Однако внедрение большого количества инверторов приводит к снижению инерции и демпфированию энергосистем и оказывает негативное влияние на устойчивость энергосистем. Технология виртуального синхронного генератора (ВСГ) позволяет имитировать в инверторе инерционные и демпфирующие характеристики традиционного синхронного генератора, что позволяет эффективно внедрять в энергосистему большое количество инверторов. В данной работе обсуждаются основной принцип ВСГ и перспективы применения технологии ВСГ при интеграции в энергосистему солнечных электростанций. Определяются основные направления будущего развития технологии ВСГ.

**Ключевые слова:** виртуальный, синхронный, генератор, инвертор, устойчивость, солнечные, электростанции, ВИЭ.

### Введение

В настоящее время в связи быстрым развитием технологий высоковольтной силовой электроники в энергосистемах вводится в эксплуатацию все больше и больше электростанций на основе ВИЭ с применением устройств силовой электроники [1]. Большое количество малых электростанций в электрической сети оказывает значительное влияние на устойчивость этой сети.

Обеспечение устойчивости в электрической сети является одной из важных задач в электроэнергетике. Аварии, связанные с нарушениями устойчивости работы в крупных электрических системах, влекут за собой нарушение электроснабжения важных потребителей электрической энергии. Тяжелые последствия таких аварий заставляют уделять значительное внимание вопросам увеличения устойчивости как при проектировании электрических станций и сетей, так и в эксплуатации.

Проблема устойчивости наложила глубокий отпечаток на схемы коммутации, режимы работы и параметры оборудования электрических систем, в том числе к вводимым в последние годы электростанциям на основе ВИЭ.

В традиционных энергосистемах роторы синхронных генераторов обладают большой инерцией вращения и большой кинетической энергией. При возникновении аварий в энергосистеме высокая кинетическая энергия роторов

оказывает поддержку для сохранения устойчивости энергосистемы. Кроме того, демпфирующая функция синхронных генераторов может помочь сдерживать колебания частоты энергосистемы. Когда в будущем малые несинхронные генерирующие установки заменят значительную часть мощности синхронной генерирующей мощности, общая инерция вращения синхронных генераторов значительно уменьшится. Это вызывает большие колебания частоты, которые могут привести к нестабильности сети.

Виртуальная инерция может быть смоделирована путем добавления к генератору кратковременного накопителя энергии в сочетании с подходящим механизмом управления для преобразователя силовой электроники (инвертора) [2,3]. Таким образом, инвертор может вести себя как «виртуальный синхронный генератор» (ВСГ) в течение коротких интервалов времени и вносить свой вклад в стабилизацию частоты сети [4,5].

Виртуальные синхронные генераторы имитируют вращающуюся инерцию в течение ограниченных временных интервалов с помощью дополнительных алгоритмов управления для поддержания работы в случае сбоев или непредвиденных обстоятельств, тем самым давая алгоритмам балансировки, устройствам управления и защиты достаточно времени для восстановления нормальной работы в системе [6].

Технология виртуального синхронного генератора (ВСГ) может обеспечить эффективное решение проблем, с которыми сталкиваются энергосистемы при наличии большого количества электростанций на основе ВИЭ с применением инверторов. Технология ВСГ также применяется в электрических системах современных самолетов [7].

В данной работе описывается основной принцип ВСГ. Также приводятся возможные перспективы применения ВСГ и дальнейшее направление их развития.

### **Основной принцип работы ВСГ**

ВСГ состоит из накопителя энергии, инвертора и системы управления (рис. 1). ВСГ преобразует источник постоянного тока в электрической сети в элемент, который с точки зрения инерции и демпфирующих свойств соответствует синхронному генератору. Фактически, виртуальная инерция симулируется путем управления активной мощностью через инвертор с помощью системы управления.

Для описания схемы управления ВСГ в качестве примера взята фотоэлектрическая установка. Взаимосвязь между инвертором и синхронным генератором показана на рис. 1.

Как показано на рис. 1, эквивалентное соотношение между инвертором и синхронным генератором может быть описано следующим образом:

- солнечные панели могут быть заменены первичным двигателем;
- накопитель энергии и инвертор могут представлять вращающуюся инерцию первичного двигателя и генератора;
- схема управления может представлять электромеханическое преобразование энергии синхронного генератора;

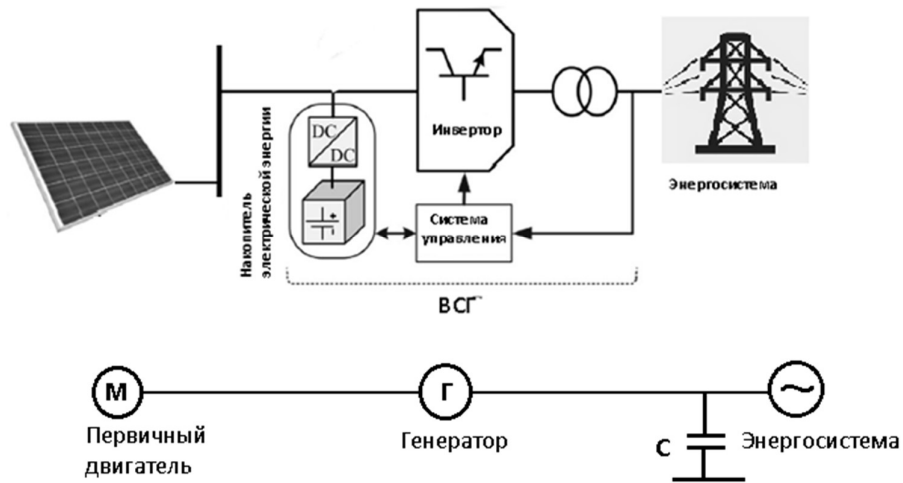


Рис. 1. Структурная схема ВСГ и взаимосвязь между инвертором и синхронным генератором

- средние выходные напряжения инвертора могут эквивалентно заменять генерируемую ЭДС синхронного генератора;
- индуктивность фильтра и соответствующее ей сопротивление можно рассматривать как индуктивность и сопротивление обмоток статора синхронного генератора.

На основе рис. 1 можно построить принципиальную схему управления ВСГ. Построенная на основе схемы управления синхронного генератора, схема управления ВСГ на базе солнечной электростанции, приведена на рис. 2 [8].

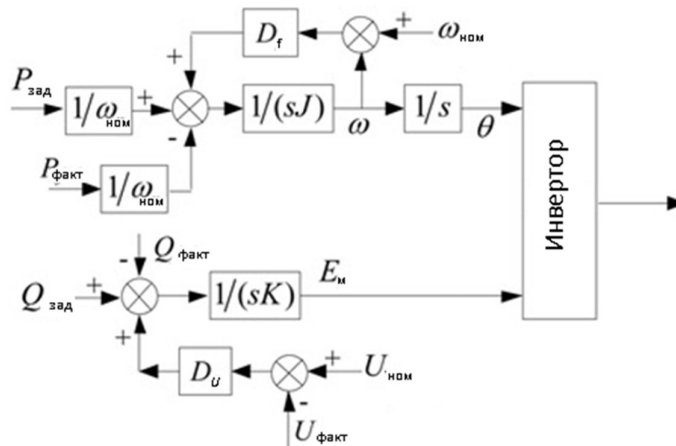


Рис.2. Алгоритм управления ВСГ

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- $P_{зад}$  и  $Q_{зад}$  - заданные значения активной и реактивной мощностей;

- $P_{\text{факт}}$ ,  $Q_{\text{факт}}$  и  $U_{\text{факт}}$  - фактическая активная мощность, реактивная мощность и напряжение на клеммах генератора;
- $D_f$  и  $D_u$  - виртуальные коэффициенты спада частоты и напряжения;
- $\omega$  - угловая частота ВСГ;
- $\omega_{\text{ном}}$  и  $U_{\text{ном}}$  - номинальная угловая частота и напряжение на клеммах генератора;
- $J$  - виртуальная инерция вращения;
- $\theta$  и  $E_m$  - фазовый угол и величина волны трехфазной модуляции.

Приведенная принципиальная схема управления позволит симулировать виртуальную инерцию и представлять электростанции на основе ВИЭ в виде традиционных синхронных генераторов.

### Перспективы применения ВСГ

Как показано на рис. 2, инвертор солнечной электростанции и другие силовые электронные устройства могут имитировать вращающуюся инерцию и демпфирующую функцию синхронного генератора, которая может эффективно реагировать на колебания частоты и напряжения электрической сети и, следовательно, способствовать безопасной и стабильной работе энергосистемы.

Таким образом, с появлением все большего количества инверторов, интегрирующихся в энергосистемы, технология ВСГ имеет широкие перспективы применения.

### Применение ВСГ на солнечной электростанции

Под влиянием изменения интенсивности освещения выходная мощность солнечной электростанции будет колебаться из-за работы электростанции в режиме выдачи максимальной мощности (без сохранения энергии в накопителях), что может негативно отразиться на стабильности напряжения электрической сети. При возникновении возмущений мощности и частоты энергосистемы солнечная электростанция не может обеспечить инерционную поддержку энергосистемы, так как выходная мощность фотоэлектрического генератора все еще определяется режимом выдачи максимальной мощности. Кроме того, при работе электростанции в режиме регулирования частоты инвертор будет строго отслеживать частоту электрической сети, что делает инверторы лишенными инерции и демпфирующей способности. Следовательно, массовый ввод в работу новых солнечных электростанций снизил бы запас устойчивости энергосистемы [9].

Для решения перечисленных проблем было предложено много видов схем управления ВСГ, основной принцип имитации инерции и демпфирования которых аналогичен приведенному на рис. 2. Применение ВСГ может эффективно решать проблему сниженной устойчивости энергосистемы с помощью солнечных электростанций с большой установленной мощностью и имеет большое значение для разработки и широкого применения инверторов электростанций. Стратегия управления демпфированием, основанная на дополнительном регулировании активной и реактивной мощностей, предложена в работах [4,5] для

повышения коэффициента демпфирования энергосистем и быстрого гашения колебаний мощности.

Для распределенных фотоэлектрических генераторов накопители энергии могут быть размещены на шине постоянного тока или в точке общей связи для имитации инерции. С другой стороны, в целях повышения экономичности и надежности в точке общей связи могут быть установлены централизованные накопители энергии.

### Заключение

Технология ВСГ может обеспечить эффективное решение проблем, с которыми сталкиваются энергосистемы при наличии большого количества электростанций на основе ВИЭ с применением инверторов. А именно, технология ВСГ может быть использована в инверторах для имитации инерции и демпфирования обычных синхронных генераторов, что может обеспечить решение проблемы снижения коэффициента инерции и демпфирования энергосистем. Таким образом, технология ВСГ имеет широкие перспективы применения в задаче обеспечения устойчивости энергосистем.

### Библиографический список

1. **Исмагилов, Ф. Р.** Исследование характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей в условиях средних широт России / Ф. Р. Исмагилов, Р. Р. Саттаров, Б. М. Гайсин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 52-58.
2. M. Torres and L. A. C. Lopes, "Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems," 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC.2009.5420953.
3. Kong, X., Pan, J., Gong, X., & Li, P. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview. The Journal of Engineering, 2017(13), 2135–2139. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0707>.
4. T. V. Van et al., "Virtual synchronous generator: An element of future grids," 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638946.
5. Robert F. Arrit, Roger C. Dugan "Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection" 2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC), doi:10.1109/REPC.2015.12
6. K. Sakimoto, Y. Miura and T. Ise, "Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function," 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 1498-1505, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944492.
7. Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback IEEE, 2019. 1–6 с.
8. Wang Y., Zhang X., Li H., ET AL.: 'Damping control of PMSG-based wind turbines for power system oscillations', Trans. China Electrotech. Soc., 2012, 27, pp. 162–171.
9. J. Driesen and K. Visscher, "Virtual synchronous generators," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp. 1-3, doi: 10.1109/PES.2008.4596800.

R. R. Sattarov, R. R. Garafutdinov

## VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR TECHNOLOGY FOR IMPROVING THE STABILITY OF POWER SYSTEMS

Ufa State Aviation Technical University

**Abstract:** With the rapid development of power electronics, more and more power plants based on renewable energy sources with the use of power electronic devices (inverters) are put into operation. However, the introduction of a large number of inverters reduces the inertia and damping of power systems and has a negative impact on the stability of power systems. Virtual synchronous generator (VSG) technology allows you to simulate the inertia and damping characteristics of a traditional synchronous generator in an inverter, which allows you to effectively implement a large number of inverters into the power system. This paper discusses the basic principle of VSG and the prospects for the application of VSG technology in the integration of solar power plants into the energy system. The main directions of the future development of the VSG technology are determined.

**Keywords:** virtual, synchronous, generator, inverter, stability, solar, power plants, RES.

### References

- [1] F. R. Ismagilov, R. R. Sattarov, B. M. Gajsin / Issledovanie harakteristik avtonomnyh istochnikov elektroenergii na osnove fotoelektricheskikh modulej v usloviyah srednih shirot Rossii // Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2015. – T. 11. – № 1. – S. 52-58.
- [2] M. Torres and L. A. C. Lopes, "Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems," 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC.2009.5420953.
- [3] Kong, X., Pan, J., Gong, X., & Li, P. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview. The Journal of Engineering, 2017(13), 2135–2139. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0707>.
- [4] T. V. Van et al., "Virtual synchronous generator: An element of future grids," 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638946.
- [5] Robert F. Arrit, Roger C. Dugan "Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection" 2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC), doi:10.1109/REPC.2015.12
- [6] K. Sakimoto, Y. Miura and T. Ise, "Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function," 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 1498-1505, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944492.
- [7] Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback IEEE, 2019. 1–6 c.
- [8] Wang Y., Zhang X., Li H., ET AL.: 'Damping control of PMSG-based wind turbines for power system oscillations', Trans. China Electrotech. Soc., 2012, 27, pp. 162–171.
- [9] J. Driesen and K. Visscher, "Virtual synchronous generators," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp. 1-3, doi: 10.1109/PES.2008.4596800.

**В.Т. Сидорова**

## **МЕТОДИКА РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИЭ**

Марийский государственный университет

**Аннотация:** В работе предлагается методика для определения мест размещения устройств распределённой генерации на основе ВИЭ в сетях низкого напряжения. Данная методика основана на решении многокритериальной задачи оптимизации. Для этого в работе исследуется целевая функция, включающая минимизацию потерь электроэнергии, потерь напряжения, стоимость установки и эксплуатации дополнительных устройств.

**Ключевые слова:** распределённая генерация, целевая функция, метод многокритериальной оптимизации, возобновляемые источники электроэнергии, весовой коэффициент.

В настоящее время идет стремительное развитие рынка транспорта на электрической тяге. По данным BNEF, уже к 2026 году средняя стоимость электромобиля станет ниже средней стоимости автомобиля. Увеличение продаж электромобилей приведет к резкому скачку потребления электрической энергии, в том числе в час «пик», когда сеть и так загружена. Индивидуальная установка станций быстрой зарядки приведет к необходимости увеличения передаваемой мощности, т.е. увеличению мощности трансформатора, в некоторых случаях и полной модернизации линии.

Одним из решений является установка зарядных станций для электромобилей для общего пользования. Для исключения необходимости модернизации сети, такие станции могут питаться от ВИЭ. При этом необходимо правильно выбрать расположение и мощности установок распределённой генерации (РГ). Существуют исследования по интеграции зарядных станций для электромобилей на основе ВИЭ в распределительные сети, например [1].

Проблема размещения распределенной генерации представляет собой задачу оптимизации дискретной нелинейной невыпуклой функции, включающей в себя места размещения устройств, их тип и мощность. В настоящее время методы искусственного интеллекта более эффективные по сравнению с классическими. Существуют работы по оптимизации режимов электроэнергетических систем, использующие различные алгоритмы, например генетические [2, 3]. Ряд авторов предлагают методы оптимального размещения в сети только устройств компенсации реактивной мощности или установок РГ, например [4]. Есть работы, которые рассматривают совместное размещения устройств компенсации реактивной мощности и установок РГ [5, 6].

В настоящее время для задач размещения устройств КРМ и (или) установок РГ обычно используется многокритериальная целевая функция. Многокритериальная целевая функция обычно включает следующие критерии: минимизация потерь электроэнергии, минимизация отклонения напряжения, минимизация издержек, минимизация потерь активной мощности, максимизация выгоды и максимизация выдачи мощности от РГ. В работе [6] предложена и исследована новая целевая функция. Она учитывает потери электроэнергии, отклонение напряжения и стоимость установки и эксплуатации дополнительных устройств:

$$F = \lambda_1 I_{\Delta P} + \lambda_2 I_{\Delta U} + \lambda_3 I_{C,DG}, \quad (1)$$

где весовые коэффициенты  $\lambda$  принимают значение от 0 до 1. При этом сумма всех коэффициентов должна быть равна 1.

Индекс потерь активной мощности определяется как отношение потерь активной мощности в сети с распределенной генерацией к потерям в той же сети без распределенной генерации:

$$I_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\Sigma,DG}}{\Delta P_{\Sigma,0}}.$$

Значение потерь активной мощности в сети определяется как сумма потерь активной мощности во всех ветвях схемы:

$$\Delta P_{\Sigma,0} = \sum_{j=1}^N \Delta P_{ij},$$

где

$$\Delta P_{ij} = R_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}.$$

Индекс отклонения напряжения ( $I_{\Delta U}$ ) характеризует средневзвешенное отклонение напряжения по всем узлам сети. Он определяется как отношение индексов напряжения в исходном состоянии и после установки дополнительных устройств РГ:

$$I_{\Delta U} = \frac{I_{U,DG}}{I_{U,0}},$$

где  $I_{U,0}$  – индекс напряжения в исходном состоянии до установки каких-либо устройств РГ, определяется по формуле:

$$I_{U,0} = \sum_{i=2}^N \left[ (U_{max} - U_i^0)^2 + (U_i^0 - U_{min})^2 \right].$$

$U_i^0$  – напряжение в сети в исходном состоянии,  $N$  – количество узлов.

$I_{U,DG}$  – индекс напряжения после размещения в сети распределенной генерации. Определяется аналогично:

$$I_{U,DG} = \sum_{i=2}^N \left[ (U_{max} - U_i^{DG})^2 + (U_i^{DG} - U_{min})^2 \right],$$

где  $U_i^{DG}$  – напряжение в сети после установки РГ.

Затраты на потери электроэнергии в сети с учетом приведенных выражений, могут быть записаны как:

$$E_e = \left( \sum_1^{T_p} E^t \right) \cdot c_e \cdot \Delta P_{\Sigma,0} \cdot T_{hr}.$$

Здесь  $c_e$  – цена на электроэнергию (\$/МВт·ч),  $T_p$  – период планирования, в годах,  $t$  – номер года,  $T_{hr}$  – количество часов в году,  $E$  – дисконтирующий множитель.



Затраты на покупку электроэнергии из внешней сети для электроснабжения потребителей, определяются общей средней величиной активной нагрузки всех потребителей, присоединенных к сети:

$$E_l = \left( \sum_1^{T_p} E^t \right) \cdot c_e \cdot \Delta P_{l\Sigma} \cdot T_{hr},$$

где  $P_{l\Sigma}$  - общая нагрузка всех потребителей в сети. Тогда полная стоимость затрат на покупку электроэнергии на центре питания будет определяться как сумма электроэнергии, отпускаемой потребителям и потерь в сети:

$$E_{c,0} = E_e + E_l = \left( \sum_1^{T_p} E^t \right) \cdot c_e \cdot P_{\Sigma} \cdot T_{hr} \quad \text{и} \quad (2)$$

$$P_{\Sigma} = P_{l\Sigma} + \Delta P_{\Sigma,0},$$

$P_{\Sigma}$  – суммарная мощность фидера (МВт). Индекс стоимости определяется как отношение годовой стоимости эксплуатации сети при наличии РГ к данному параметру для исходного состояния рассматриваемой сети:

$$И_{C,DG} = \frac{E_{C,DG}}{E_{C,0}}.$$

Годовая стоимость эксплуатации сети  $E_{C,DG}$  с установленными РГ будет определяться выражением

$$E_{C,DG} = E_{DG} + E_{\Delta P,DG}.$$

Здесь  $E_{DG}$  – общая стоимость установки и эксплуатации РГ, определяется их суммой;  $E_{\Delta P,DG}$  – стоимость покупки электроэнергии из внешней сети, включая потери электроэнергии в распределительной сети, после установки дополнительных устройств.  $E_{\Delta P,DG}$  определяется аналогично выражению (2).

$$E_{DG} = E_{inst} + E_{serv} = k_{DG} \sum_j^{N_{DG}} P_{DG,j} + \left( \sum_{t=1}^{T_p} E^t \right) \cdot k_{DG,serv} \cdot \sum_j^{N_{DG}} P_{DG,j} \cdot T_{hr},$$

где  $P_{DG}$  – активная мощность распределённой генерации. В данной работе удельные затраты на эксплуатацию и обслуживание РГ ( $k_{DG,serv}$ ) и их удельная стоимость ( $k_{DG}$ ) приняты на основании [7] 36 \$/МВтч·год и 400 000 \$/МВт соответственно.

При поиске оптимального решения учитывались ограничения на напряжение в каждом узле нагрузки и общий объем генерации активной мощности распределенной генерации. Дополнительно накладывались ограничения на общую мощность компенсирующих устройств и коэффициент мощности в сети.

В работе [6] было проведено исследование по определению мест размещения как ветрогенераторов, так и фотоэлектрических установок в качестве устройств распределенной генерации. В данной же работе проведено исследование использования в качестве устройств распределённой генерации только фотоэлектрических установок. При этом задача оптимизации была решена с использованием целевой функции (1) и с ее использованием без учета в ней критерия минимизации отклонения напряжения. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

В качестве установок распределённой генерации были выбраны солнечные энергетические установки, поскольку в отличие от ветрогенераторов они имеют коэффициент мощности, близкий к единицы. Поскольку при уменьшении

передаваемой мощности в линии уменьшаются потери напряжения, было предложено исключить критерий минимизации отклонения напряжения из целевой функции (1). Для исследования в данной работе использована воздушная линия 0,4 кВ с типичными для нее нагрузками и конфигурацией (рис. 1). Данная схема состоит из 23 узлов, имеет один главный фидер и три ответвления. Длина самой длинной линии составляет 0,6 км. Мощности нагрузок в узлах приведены в табл 1.

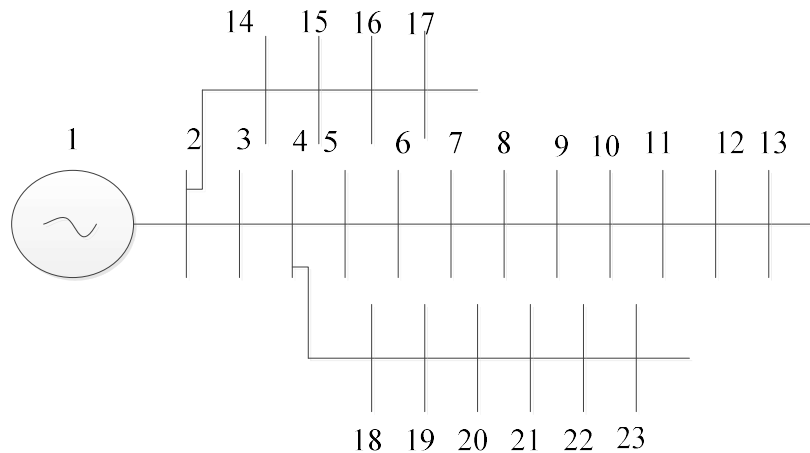


Рис. 1. Исследуемая схема

Таблица 1

Мощности нагрузок в узлах исследуемой сети

Р, кВт	0,8	1	1,5	2	3	1,1	6	1,5	3	2,5	1
N узла	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
Р, кВт	0,8	1,3	0,6	1,8	3	3	1,2	0,7	0,8	1,7	2,3
N узла	2	17	16	15	14	23	22	21	20	19	18

Расчет проводился в два этапа. Сначала были определены коэффициенты чувствительности по активной мощности. Далее выбраны узлы, имеющие максимальные коэффициенты чувствительности. Для решения поставленных задач использовался программный комплекс MATLAB (версия R2020a).

Коэффициенты чувствительности потерь активной мощности определяются для всех линий как первая производная от величины потерь активной мощности в линии по активной мощности в узле  $j$ :

$$K_{\Delta P} = \frac{d\Delta P}{dP_j} = \frac{2P_j R_{ij}}{U_j^2}.$$

Здесь  $\Delta P = R_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}$ .

Линия заменяется дальним относительно питающего центра ограничивающим ее узлом. Для узлов определяются коэффициенты чувствительности напряжения. Коэффициент чувствительности напряжения  $K_U$  определяется как отношение значений напряжений в узлах к предельному нижнему значению (0,95 о.е.). Из всех узлов выбираются те, для которых коэффициенты чувствительности потерь активной мощности наибольшие, а коэффициенты чувствительности напряжения наименьшие.

Как следует из результатов, далее для оптимизации выбираются узлы под номерами 7, 9, 10, 22. Результат оптимизации целевой функции (1) проводился с помощью генетического алгоритма. По результатам расчетов были определены узлы 7, 9 и 22 как оптимальные для установки РГ. Также были определены оптимальные мощности установок РГ для каждого узла.

Эффективность многофакторной целевой функции во многом зависит от правильного выбора весовых коэффициентов. Поэтому было проведено сравнение между различными комбинациями весовых коэффициентов. Минимальное значение целевой функции соответствует значению весовых коэффициентов  $\lambda_1 = 0,8$  и  $\lambda_2 = 0,1$ ,  $\lambda_3 = 0,1$ . Для дальнейшего использования были выбраны коэффициенты 0,8, 0,1 и 0,1, соответственно. По результатам расчета, суммарная мощность устанавливаемых установок РГ составляет 50 кВт. Потери активной мощности после установки РГ составят  $\Delta P_{\Sigma} = 6,2$  кВт, индексы  $I_{\Delta P} = 0,56$ ,  $I_{C,DG} = 1,003$ ,  $I_{\Delta U} = 0,9258$ . При этом потери активной мощности уменьшатся в два раза, увеличится коэффициент мощности в сети и уменьшится отклонение напряжения.

Далее был проведен расчет этой же цепи без учета критерия минимизации отклонения напряжения. Минимальное значение целевой функции соответствует значению весовых коэффициентов  $\lambda_1 = 0,8$  и  $\lambda_2 = 0,2$ . По результатам расчета, суммарная мощность устанавливаемых установок РГ составляет 55 кВт. Потери активной мощности после установки РГ составят  $\Delta P_{\Sigma} = 5,88$  кВт, индексы  $I_{\Delta P} = 0,53$ ,  $I_{C,DG} = 1,003$ . Результаты потерь активной мощности после установки РГ для случаев с учетом критерия минимизации отклонения напряжения и без него практически одинаковы. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии необходимости включения в целевую функцию критерия минимизации отклонения напряжения, при учете ограничения, накладываемого на уровни напряжения в узлах. Полученные результаты были подтверждены на сети с большим количеством узлов.

### Заключение

В работе предложена методика определения мест установки РГ на основе ВИЭ в распределительные сети низкого напряжения. Для решения данной задачи предложена целевая функция, включающая критерии минимизации потери электроэнергии и стоимости установки и эксплуатации дополнительных устройств. При поиске оптимального решения учитывались ограничения на объем

генерации активной мощности распределенной генерации и значения напряжений в узлах нагрузки.

#### Библиографический список

1. G. Caneponi et al /EV Charging Stations and RES-Based DG: a Centralized Approach for Smart Integration in Active Distribution Grids// International journal of renewable energy research, Vol.9, No.2, June, 2019. – p. 605-612.
2. **Ахмедова, С.Т.** Оперативная оптимизация режима энергосистемы с использованием комбинированной модели нейронной сети и генетического алгоритма / С.Т. Ахмедова, Н.Р. Рахманов // Электро. - 2009. - № 1. - С. 7-12.
3. **Павлюченко, Д.А.** Разработка и исследование генетических алгоритмов для анализа и оптимизации режимов электроэнергетических систем: дис. ... канд. тех. наук / Д.А. Павлюченко. - Новосибирск, 2003. - 176 с.
4. **Рахманов, Н.Р.** Оптимизация размещения установок распределённой генерации в энергосистеме / Н.Р. Рахманов, О.З. Керимов, А.Д. Зейналов, С.Т. Ахмедова // Электро. - 2010. - № 3. - С. 27-30.
5. M. Dehghani, M. Mardaneh, Z. Montazeri, A. Ehsanifar, M.J. Ebadi, O.M. Grechko Spring search algorithm for simultaneous placement of distributed generation and capacitors/ Electrical Engineering & Electromechanics. 2018. no.6. – p. 68 – 73.
6. **Толба Мохамед Али Хассан** Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств в возобновляемой распределенной генерации в радиальных электрических сетях / Мохамед Али Хассан Толба // дисс. кан. тех. наук, Москва, 2018. – 171 с.
7. Т.М.А. Hassan “Developmen of methods for optimization the positioning of compensating devices and renewable distributed generation in radial electric networks”, Diss. can. those. sciences, Moscow, 2018, 171 p.

V.T. Sidorova

## DETERMINING NETWORK CONNECTIONS RES CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES

Mari State University  
Yoshkar-Ola, Russia

**Abstract:** This paper proposes a methodology for determining the connection points of charging stations for electric vehicles based on renewable energy sources in low voltage networks. It is assumed that during the absence of charged electric vehicles, charging stations can generate electricity to smooth out the load peaks of the nearest transformer substation or sell it to the external grid. This technique is based on solving a multicriteria optimization problem. To this end, the work investigates the target function, including the minimization of electricity losses, voltage losses, the cost of installing and operating additional devices.

**Key words:** distributed generation, target function, multi-criteria optimization method, renewable energy sources, electric vehicles, weight coefficient.

### References

- [1] G. Caneponi et al /EV Charging Stations and RES-Based DG: a Centralized Approach for Smart Integration in Active Distribution Grids// International journal of renewable energy research, Vol.9, No.2, June, p. 605-612, 2019.
- [2] Akhmedova S.T. Operational optimization of the power system mode using a combined model of a neural network and a genetic algorithm / S.T. Akhmedova, N.R. Rakhmanov // Electro. No. 1, p. 7-12, 2009.
- [3] Pavlyuchenko D.A. Development and research of genetic algorithms for analysis and optimization of modes of electric power systems: dis. ... Cand. those. sciences / D.A. Pavlyuchenko, Novosibirsk, 176 p, 2003.
- [4] Rakhmanov N.R. Optimization of the placement of distributed generation units in the power system / N.R. Rakhmanov, O.Z. Kerimov, A.D. Zeynalov, ST. Akhmedova // Electro, No. 3, p. 27-30, 2010.
- [5] M. Dehghani, M. Mardaneh, Z. Montazeri, A. Ehsanifar, M.J. Ebadi, O.M. Grechko Spring search algorithm for simultaneous placement of distributed generation and capacitors/ Electrical Engineering & Electromechanics, no. 6, p. 68 – 73, 2018.
- [6] Tolba Mohamed Ali Hassan Development of methods for optimizing the placement of compensating devices in renewable distributed generation in radial electrical networks // Diss. can. those. Sciences, Moscow, 171 p., 2018.
- [7] T.M.A. Hassan “Development of methods for optimization the positioning of compensating devices and renewable distributed generation in radial electric networks”, Diss. can. those. sciences, Moscow, 171 p., 2018.

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Л.Е. Веселов, Р.А. Шароватов

## МЕТОДИКА ВЫБОРА УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ТОТЭ В СОСТАВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

**Аннотация:** Статья посвящена разработке методики выбора оптимальной установленной мощности твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на биогазе из переработанных отходов сельхозпроизводства. Рассмотрена система электроснабжения животноводческого предприятия, получающего электроэнергию от централизованной электрической сети. Разработана методика выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ по критериям экономической и экологической эффективности для интеграции в систему электроснабжения. Методика основана на модифицированном методе последовательных уступок и методе поразрядного поиска. С помощью компьютерной программы на базе Excel и разработанной базы данных по ТОТЭ проведено исследование эффективности интеграции ТОТЭ в систему электроснабжения.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, твердооксидный топливный элемент, биогаз, сельскохозяйственное предприятие.

### Введение

Перспективное направление развития систем электроснабжения сельского хозяйства связано с расширением использования источников распределенной генерации (РГ), работающих на биогазе из утилизированных отходов производства [1]. Применение таких источников электроэнергии позволит улучшить качество электроснабжения (увеличить надежность, снизить потери электроэнергии и т.д.) и повысить эффективность утилизации отходов сельхозпроизводства (сократить площади земель, занятых под хранение отходов). Сравнительный анализ источников РГ показал, что наибольшими преимуществами при работе на биогазе обладают твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) [2].

Для эффективной интеграции источника РГ в систему электроснабжения важным вопросом является выбор оптимальной установленной мощности источника в заданных условиях [3]. Для многих типов источников РГ разработаны и научно обоснованы подходы к выбору их установленной мощности, основанные на нахождении экстремума функции установленной мощности по одному или нескольким критериям путем решения оптимизационной задачи. В данном направлении широко применяются методы линейного программирования, эвристические алгоритмы поиска, методы численной оптимизации и т. д. [4].

ТОТЭ по своим характеристикам отличаются от других типов источников РГ. ТОТЭ являются энергоэффективными и экологичными источниками, но с низкой маневренностью и высокой удельной стоимостью 1 кВт установленной мощности. В отличие от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как

ветровые и фотоэлектрические электростанции, производство электроэнергии ТОТЭ является прогнозируемым и не зависит от внешних условий. При этом в отличие от большинства источников РГ, работающих на традиционном топливе, вследствие низкой скорости протекания химических реакций энергоустановки на ТОТЭ являются низкоманевренными, что затрудняет использование ТОТЭ для электроснабжения потребителей с изменяющимися суточными графиками нагрузки [5].

Таким образом, при выборе установленной мощности ТОТЭ возникают конфликтующие критерии. Так, чем больше установленная мощность ТОТЭ, тем больше электрической энергии предприятие может получить от собственного экологичного источника. Но при этом значительно увеличиваются капитальные затраты на ТОТЭ. Кроме того, при увеличении установленной мощности ТОТЭ часть производимой электроэнергии может оказаться невостребованной. Исходя из этого, выбор установленной мощности ТОТЭ по пиковой нагрузке потребителей является нецелесообразным.

В России отсутствуют методические основы проектирования систем электроснабжения с ТОТЭ. Вопросы выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ на биогазе не проработаны. Цель работы заключается в разработке методики выбора установленной мощности ТОТЭ, ее реализации в виде компьютерной программы и исследовании эффективности применения ТОТЭ на биогазе в системе электроснабжения животноводческого предприятия.

### **Система электроснабжения животноводческого предприятия с ТОТЭ на биогазе**

Объектом исследования является система электроснабжения животноводческого предприятия. Предприятие имеет биогазовую установку, установки накопления и очистки биогаза. Источниками электрической энергии являются энергоустановка на ТОТЭ, работающая на биогазе, и централизованная электрическая сеть. ТОТЭ является основным источником электрической энергии. За счет электрической мощности из централизованной электрической сети покрываются пиковые нагрузки предприятия (в дневное время).

Математическое описание представленного принципа работы системы электроснабжения имеет следующий вид:

$$P_H(t) = P_{ТОТЭ}(t) + P_{ЦЭС}(t) - \Delta P(t) - P_{БН}(t), \quad (1)$$

где  $P_H$  – мощность нагрузки предприятия (кВт);  $P_{ТОТЭ}$  – мощность, вырабатываемая ТОТЭ (кВт);  $P_{ЦЭС}$  – мощность от централизованной электрической сети (кВт);  $\Delta P$  – потери мощности в распределительной электрической сети предприятия;  $P_{БН}$  – мощность ТОТЭ, утилизируемая на балластной нагрузке;  $(t)$  – текущий момент времени.

$P_H$  в работе задается с помощью суточных графиков электрической нагрузки с частотой дискретизации один час.

$P_{\text{ТОТЭ}}$  определяется как средняя мощность, которую может поддерживать энергоустановка на ТОТЭ на протяжении длительного времени исходя из биогазового потенциала животноводческого предприятия:

$$P_{\text{ТОТЭ}}(t) = V_{\text{БГ}} / (24 \cdot F_{\text{ТОТЭ}}), \quad (2)$$

где  $V_{\text{БГ}}$  – суточный объем биогаза, производимого на предприятии ( $\text{м}^3$ ) [6];  $F_{\text{ТОТЭ}}$  – средний удельный расход первичного газообразного топлива ТОТЭ на выработку 1 кВтч ( $\text{м}^3/\text{кВтч}$ ).

$\Delta P$  учитываются, если в состав системы электроснабжения животноводческого предприятия входит ЛЭП среднего напряжения 6(10) кВ и (или) трансформаторная подстанция 6(10)/0,4 кВ:

$$\Delta P(t) = \Delta P_{\text{ЛЭП}}(t) + \Delta P_{\text{ТР}}(t), \quad (3)$$

где  $\Delta P_{\text{ЛЭП}}$  – потери мощности в ЛЭП среднего напряжения;  $\Delta P_{\text{ТР}}$  – потери мощности в трансформаторе.

$P_{\text{ЦЭС}}$  и  $P_{\text{БН}}$  для текущего момента времени определяются в зависимости от соотношения  $P_{\text{Н}}$  и  $P_{\text{ТОТЭ}}$ :

$$P_{\text{ЦЭС}}(t) = \begin{cases} P_{\text{Н}}(t) - P_{\text{ТОТЭ}}(t); & P_{\text{Н}}(t) > P_{\text{ТОТЭ}}(t) \\ 0; & P_{\text{Н}}(t) \leq P_{\text{ТОТЭ}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{\text{БН}}(t) = \begin{cases} P_{\text{ТОТЭ}}(t) - P_{\text{Н}}(t); & P_{\text{Н}}(t) < P_{\text{ТОТЭ}}(t) \\ 0; & P_{\text{Н}}(t) \geq P_{\text{ТОТЭ}}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Если  $P_{\text{Н}}(t) \leq P_{\text{ТОТЭ}}(t)$ , то нагрузка полностью покрывается за счет вырабатываемой мощности ТОТЭ и избыток мощности ТОТЭ утилизируется на балластной нагрузке (например, для работы водонагревателей). Если  $P_{\text{Н}}(t) > P_{\text{ТОТЭ}}(t)$ , то недостаток мощности покрывается за счет централизованной электрической сети. Правила распределения электрической нагрузки предприятия по источникам электроэнергии, выраженные в виде логических условий для текущего момента времени, представлены на рис.1.

Суммарная выработка электроэнергии источниками за расчетный период определяется по выражениям:

$$W_{\text{ЦЭС}} = \Sigma[P_{\text{ЦЭС}}(t) \cdot \Delta t]; \quad (6)$$

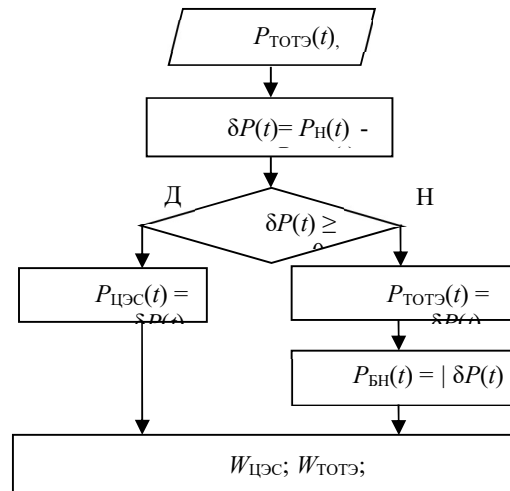
$$W_{\text{ТОТЭ}} = \Sigma[P_{\text{ТОТЭ}}(t) \cdot \Delta t]. \quad (7)$$

где  $\Delta t$  – шаг расчетного периода (ч)

Суммарная электроэнергия, утилизируемая на балластной нагрузке, определяется по выражению:

$$W_{\text{БН}} = \Sigma[P_{\text{БН}}(t) \cdot \Delta t]; \quad (6)$$





**Рис. 1. Алгоритм распределения электрической мощности по элементам системы электроснабжения**

На основе представленных выражений и алгоритмов разработана компьютерная программа на базе Excel, позволяющая рассчитать показатели работы системы электроснабжения на протяжении заданного расчетного периода. Весь период разбивается на одинаковые малые интервалы времени ( $\Delta t$ ). На протяжении каждого интервала времени считаются неизменными нагрузка потребителей, состав работающих источников и производимая ими мощность. Для каждого интервала времени решается задача распределения электрической мощности между элементами системы электроснабжения.

### Критерии оптимизации установленной мощности ТОТЭ

В работе рассматриваются пять показателей эффективности применения ТОТЭ на биогазе в системе электроснабжения животноводческого предприятия:

- 1) коэффициент использования установленной мощности ТОТЭ (КИУМ), %;
- 2) средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии ТОТЭ на протяжении всего жизненного цикла (LCOE), руб/кВтч;
- 3) комплексные затраты на электроснабжение предприятия за расчетный период ( $C_{\Sigma}$ ), млн. руб.;
- 4) дисконтированные комплексные затраты на электроснабжение предприятия за расчетный период ( $C_{д\Sigma}$ ), млн. руб.;
- 5) объем использованного для работы ТОТЭ биогаза, произведенного из отходов сельхозпроизводства, за определенный период ( $V_{БГ\Sigma}$ ), тыс. м<sup>3</sup>.

КИУМ для ТОТЭ может быть определен как отношение электроэнергии, потребленной предприятием от ТОТЭ, к суммарной произведенной электроэнергии ТОТЭ за определенный период времени, например 1 год:

$$\text{КИУМ} = (100 \cdot W_{\text{н.ТОТЭ}}) / W_{\text{ТОТЭ}} = (100 \cdot W_{\text{н.ТОТЭ}}) / (P_{\text{НОМ}} \cdot 8760), \quad (7)$$

где  $W_{\text{н.ТОТЭ}}$  – электроэнергия, потребленная предприятием от ТОТЭ (кВтч);  $P_{\text{НОМ}}$  – установленная (номинальная) мощность ТОТЭ (кВт).

Значение LCOE для ТОТЭ определяется по выражению:

$$\text{LCOE} = \Sigma [(C_{\text{КАП}} + C_{\text{T}} + C_{\text{РП}}) \cdot (1 + r)^{-t}] / \Sigma W_{\text{н.ТОТЭ}}, \quad (8)$$

где  $C_{\text{КАП}}$  – капитальные затраты на ТОТЭ (млн.руб.);  $C_{\text{T}}$  – затраты на техническое обслуживание (млн.руб.);  $C_{\text{РП}}$  – затраты на рабочий персонал (млн.руб.);  $r$  – ставка дисконтирования для года  $t$ .

Комплексные затраты на электроснабжение предприятия за расчетный период определяются следующим образом:

$$C_{\Sigma} = \Sigma [C_{\text{КАП}} + C_{\text{T}} + C_{\text{РП}} + C_{\text{ЦЭС}}], \quad (9)$$

где  $C_{\text{ЦЭС}}$  – затраты на покупку электроэнергии от централизованной электрической сети.

Капитальные затраты на ТОТЭ относятся к первому году расчетного периода. Экономия за счет использования ТОТЭ, которая обеспечивает возврат капитальных вложений, приходится на последующие годы. Дисконтированные комплексные затраты позволяют привести разновременные денежные потоки к одному моменту времени:

$$C_{\text{ДС}} = \Sigma [C_{\Sigma} \cdot (1 + r)^{-t}], \quad (10)$$

Объем использованного для работы ТОТЭ биогаза, произведенного из отходов сельхозпроизводства, за определенный период времени (например, 1 год) определяется по выражению:

$$V_{\text{БГ}\Sigma} = \Sigma [P_{\text{ТОТЭ}}(t) \cdot F_{\text{ТОТЭ}} \cdot \Delta t] = 8760 \cdot P_{\text{НОМ}} \cdot F_{\text{ТОТЭ}}. \quad (11)$$

Объем использованного для работы ТОТЭ биогаза пропорционален массе переработанных отходов сельхозпроизводства. Таким образом, чем выше значения КИУМ и  $V_{\text{БГ}\Sigma}$ , и чем ниже значения LCOE,  $C_{\Sigma}$  и  $C_{\text{ДС}}$ , тем более эффективным является применение ТОТЭ в системе электроснабжения предприятия.

Критерии  $C_{\text{ДС}}$  и  $V_{\text{БГ}\Sigma}$  использованы при разработке методики выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ.

### Методика выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ

Методика выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ ( $P_{\text{НОМ}}$ ) основана на модифицированном методе последовательных уступок, методе поразрядного поиска и базе данных по ТОТЭ (рис. 2).

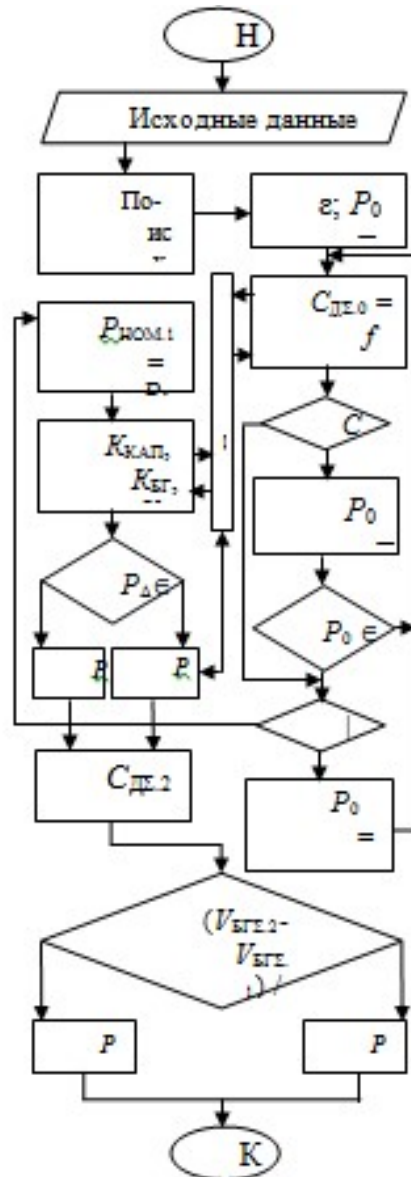


Рис. 2. Блок-схема алгоритма выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ на биогазе

База данных содержит информацию о технических характеристиках и стоимости ТОТЭ с различной установленной мощностью (более 100 моделей ТОТЭ различных производителей) [7]. База данных реализована в системе управления базами данных *MySQL Workbench 8.0 CE*.

Критерии оптимизации  $P_{ном}$  ранжированы по степени важности.  $C_{дΣ}$  является более важным (первым) критерием.  $V_{БГΣ}$  является менее важным (вторым) критерием. Суть методики заключается в том, чтобы путем допустимого отклонения от оптимального значения  $P_{ном}$  по первому критерию добиться улучшения значения второго критерия. Алгоритм выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ состоит из следующих этапов.

Вначале задаются исходные данные (параметры животноводческого предприятия, информация об энергоносителях и тарифах). Далее определяется минимальная возможная ( $P_{\text{MIN}}$ ) и максимальная допустимая ( $P_{\text{MAX}}$ ) установленная мощность ТОТЭ.  $P_{\text{MIN}}$  принимается равной минимальной электрической нагрузке предприятия.  $P_{\text{MAX}}$  рассчитывается с учетом возможности суточного объема производства биогаза.

Определяется оптимальная установленная мощность ТОТЭ по первому критерию ( $P_{\text{НОМ.1}}$ ) с помощью метода поразрядного поиска. Для этого задается допустимая погрешность определения точки экстремума ( $\epsilon$ ) и выбирается начальный шаг ( $\Delta$ ). Данные по ТОТЭ соответствующей мощности запрашиваются из базы данных.

Для  $P_{\text{НОМ.1}}$  производится расчет  $C_{\text{ДС.1}}$  и  $V_{\text{БГΣ}}$  с помощью экспертной оценки задаются коэффициенты:

- $K_{\text{КАП}}$  – коэффициент допустимого увеличения капитальных затрат на установку ТОТЭ;
- $K_{\text{БГ}}$  – коэффициент целесообразного увеличения объема биогаза для работы ТОТЭ (увеличение массы утилизированных отходов сельхозпроизводства);
- $K_{\text{С}}$  – коэффициент приемленного учеления дисконтированных комплексных затрат на электроснабжение предприятия.

Рассчитывается допустимая уступка по первому критерию ( $\Delta C$ ) и определяется новая установленная мощность ТОТЭ ( $P_{\Delta}$ ), которая соответствует увеличенным на допустимую уступку капитальным затратам.

Выполняется оптимизация установленной мощности ТОТЭ по второму критерию. Для новой установленной мощности ТОТЭ ( $P_{\Delta}$ ) выполняется расчет дисконтированных комплексных затрат на электроснабжение предприятия ( $C_{\text{ДС.2}}$ ) и объема биогаза для работы ТОТЭ ( $V_{\text{БГΣ.2}}$ ). С помощью оценки коэффициентов  $K_{\text{БГ}}$  и  $K_{\text{С}}$  определяется целесообразность перехода от  $P_{\text{НОМ.1}}$  (оптимальная мощность ТОТЭ по первому критерию) к  $P_{\text{НОМ.2}}$  (оптимальная мощность ТОТЭ по второму критерию).

В итоге определяется установленная мощность ТОТЭ ( $P_{\text{НОМ}}$ ), которая является оптимальной по критериям экономической и экологической эффективности.

### **Исследование эффективности применения ТОТЭ в системе электроснабжения животноводческого предприятия**

С помощью компьютерной программы на базе Excel, основанной на выражениях (1)-(11) и алгоритме выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ (рис. 2), а также базы данных проведено исследование эффективности применения ТОТЭ на биогазе в системе электроснабжения животноводческого предприятия.

Расчетный период (жизненный цикл системы) принят равным 10 годам ( $T = 10$ ). Основные исходные данные для проведения исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные исходные данные для исследования

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Количество крупного рогатого скота	$M_{крс}$	шт.	2000
Удельная стоимость 1 кВт ТОТЭ	$C_{уд.тогэ}$	тыс.руб./кВт	250
Средний удельный расход биометана ТОТЭ	$F_{тогэ}$	м <sup>3</sup> /кВтч	0,24
Ежегодные затраты на обслуживание ТОТЭ (от стоимости ТОТЭ)	$C_T$	%	5
Ежегодные затраты на персонал	$C_{пп}$	тыс.руб.	1200
Тариф на электроэнергию, покупаемую из централизованной электрической сети	$T_{цэс}$	руб./кВтч	10
Ставка дисконтирования	$r$	%	15

Исходные данные по электрической нагрузке предприятия заданы с помощью суточных графиков нагрузки за характерные летние ( $N_L = 205$ ) и зимние сутки ( $N_Z = 160$ ).

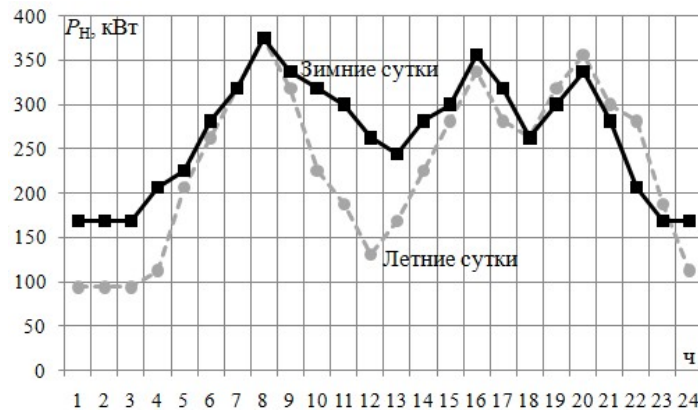


Рис. 3. Графики электрической нагрузки за характерные летние и зимние сутки

Максимумы нагрузки животноводческого предприятия в летние и зимние сутки практически совпадают. Максимальная нагрузка предприятия приходится на 8 утра, 16 и 20 часов дня.

При расчете показателей работы системы электроснабжения на протяжении расчетного периода были приняты следующие допущения:

- не учитывалась возможность дополнительного использования тепловой энергии от ТОТЭ для теплоснабжения предприятия;

- удельная стоимость 1 кВт установленной мощности ТОТЭ и удельный расход биометана ТОТЭ были приняты одинаковыми для всех моделей ТОТЭ.

Заданы границы поиска оптимальной установленной мощности ТОТЭ. Значение  $P_{\text{MIN}}$  принято равным 90 кВт (минимальная электрическая нагрузка предприятия). Значение  $P_{\text{MAX}}$  определено с учетом максимально возможного суточного объема производства биогаза ( $V_{\text{БГ,MAX}} = 3025 \text{ м}^3$ ) и равно 525 кВт.

На основе разработанной методики (рис. 2) проведен выбор оптимальной установленной мощности ТОТЭ ( $P_{\text{НОМ}}$ ). Для поиска оптимального значения  $P_{\text{НОМ}}$  по первому критерию задана допустимая погрешность  $\varepsilon = 50$  кВт и выбран начальный шаг:

$$\Delta = (525-90)/4 = 108,75 \text{ кВт.}$$

Результаты поиска оптимального значения  $P_{\text{НОМ}}$  по первому критерию приведены в таблице 2.

*Таблица 2*

**Результаты поиска оптимальной установленной мощности ТОТЭ по критерию дисконтированных комплексных затрат**

Точка поиска	$\Delta$ , кВт	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$P_{\text{НОМ.БД}}$ , кВт	$C_{\text{ДС}}$ , млн. руб.
0	-	90	100	113,32
1	108,75	198,75	200	109,67
2	108,75	308,75	300	118,5
3	-27,19	272,81	250	112,25
4	-27,19	222,81	200	109,67
5	-27,19	172,81	150	110,4

В таблице  $P_{\text{НОМ.БД}}$  – это установленная (номинальная) мощность ТОТЭ из базы данных.

Оптимальная установленная мощность ТОТЭ по первому критерию ( $P_{\text{НОМ.1}}$ ) равна 200 кВт. При использовании ТОТЭ данной мощности критерии эффективности будут равны:  $C_{\text{ДС.1}} = 109,67$  млн.руб. и  $V_{\text{БГС.1}} = 420,48$  тыс.м<sup>3</sup>. Распределение электрической нагрузки предприятия по источникам электроэнергии при установленной мощности ТОТЭ 200 кВт показано на рас. 4.

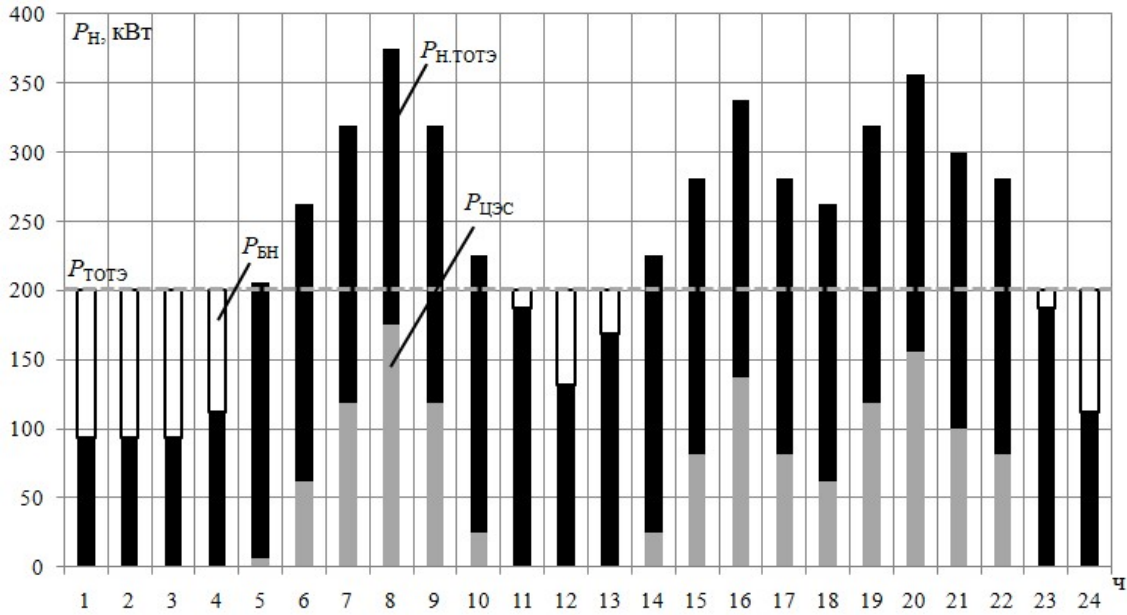
Для оптимизации установленной мощности ТОТЭ по второму критерию была принята возможность увеличения капитальных затрат на установку ТОТЭ на 10% ( $K_{\text{КАП}} = 10\%$ ). С учетом этого определена новая установленная мощность ТОТЭ ( $P_{\Delta}$ ):

$$P_{\Delta} = [(1 + K_{\text{КАП}}/100) \cdot C_{\text{КАП.1}}] / C_{\text{уд.ТОТЭ}} = (1,1 \cdot 55) / 0,25 = 242 \text{ кВт}$$

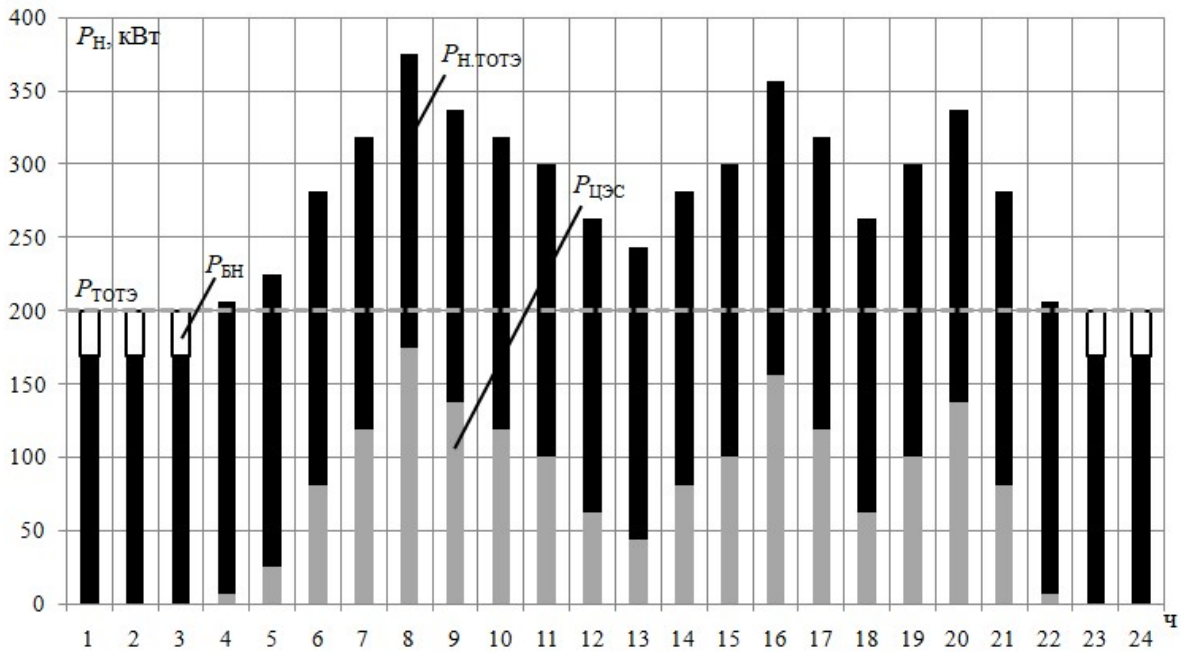
При использовании значений установленной мощности ТОТЭ из базы данных  $P_{\Delta} = 250$  кВт. Для  $P_{\Delta}$  выполнен расчет критериев эффективности:  $C_{\text{ДС.2}} = 112,25$  млн руб. и  $V_{\text{БГС.2}} = 525,6$  тыс.м<sup>3</sup>.

Таким образом, при переходе от  $P_{\text{НОМ.1}}=200$  кВт к  $P_{\text{НОМ.2}}=250$  кВт дисконтированные комплексные затраты на электроснабжение

животноводческого предприятия (за 10 лет) увеличится на 2%. При этом объем использованного для работы ТОТЭ биогаза за 1 год (следовательно, масса переработанных отходов сельхозпроизводства) увеличится на 25% (рис. 5).



а)



б)

Рис. 4. Распределение нагрузки предприятия по источникам электроэнергии при  $P_{\text{ном}} = 200$  кВт: а – для характерных летних суток; б – для характерных зимних суток

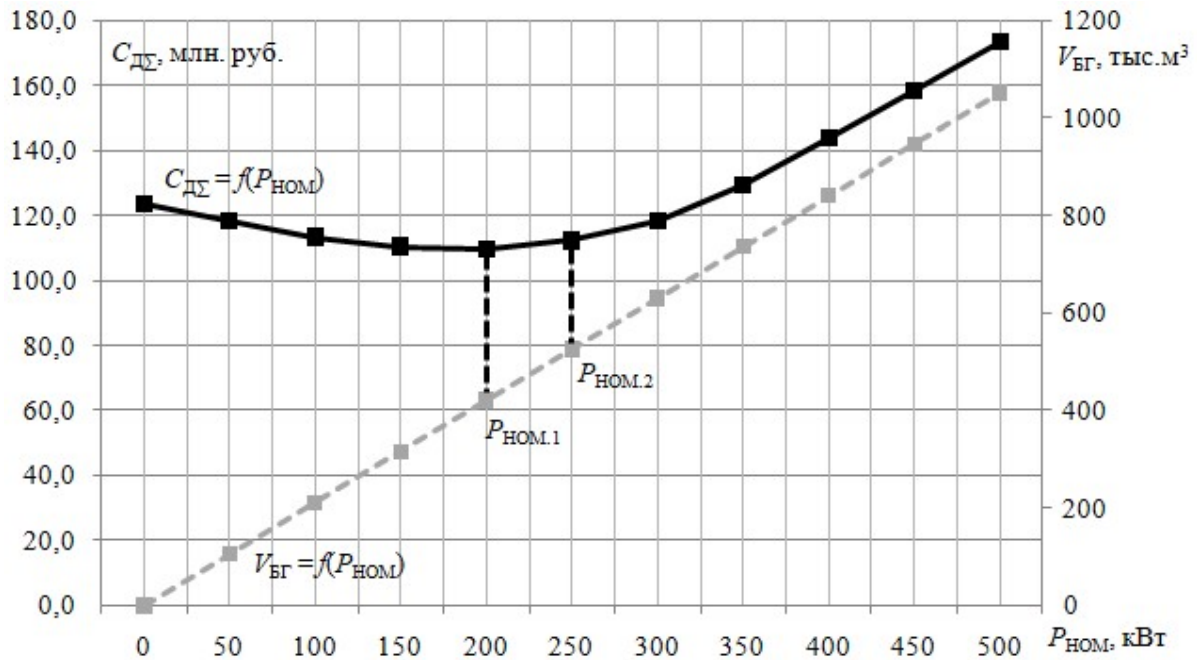
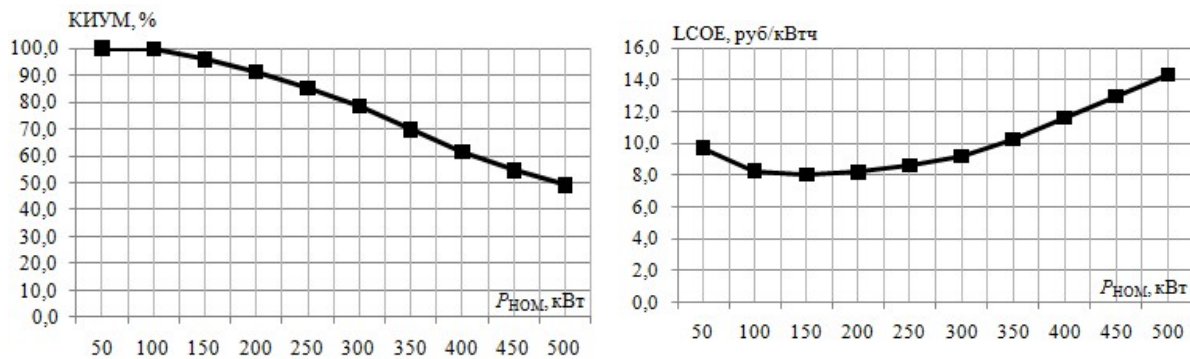


Рис. 5. Поиск оптимальной установленной мощности ТОТЭ

Из рис. 5 видно, что функция  $C_{дс} = f(P_{ном})$  имеет выраженный экстремум. Это связано с существенными капитальными затратами в первый год проекта. Значение  $C_{дс}$  без ТОТЭ ( $P_{ном} = 0$ ) превышает значение  $C_{дс}$  при использовании ТОТЭ установленной мощностью от 150 до 250 кВт. Значения  $C_{дс}$  изменяются незначительно и близки к минимуму при использовании ТОТЭ установленной мощностью от 150 до 250 кВт. Итоговый выбор  $P_{ном}$  определяется возможностью увеличения капитальных затрат на установку ТОТЭ.

Путем имитации работы системы электроснабжения на протяжении расчетного периода и итеративном изменении установленной мощности ТОТЭ от 0 до 500 кВт получены функции зависимости показателей эффективности применения ТОТЭ (КИУМ, LCOE,  $C_{\Sigma}$ ) от  $P_{ном}$  (рис. 6).





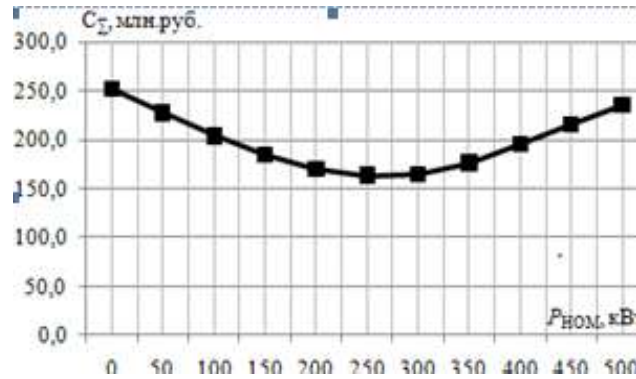


Рис. 6. Функции зависимости показателей эффективности применения ТОТЭ от номинальной мощности установки

Из рис. 6 видно, что значения КИУМ снижаются при увеличении установленной мощности ТОТЭ. Это обусловлено низкой маневренностью ТОТЭ при изменяющихся суточных графиках нагрузки предприятия. При увеличении  $P_{\text{ном}}$  возрастает доля производимой ТОТЭ электроэнергии, которая утилизируется на балластной нагрузке. В связи с этим (при отсутствии возможности выдачи в централизованную электрическую сеть излишков производимой ТОТЭ электроэнергии) представляется актуальным рассмотреть применение системы накопления электроэнергии, позволяющей приблизить графики выдачи мощности от ТОТЭ к графику электрических нагрузок.

Функции показателей экономической эффективности применения ТОТЭ (LCOE и  $C_{\Sigma}$ ) имеют точки минимума. При достижении определенного значения  $P_{\text{ном}}$  начинает увеличиваться доля вырабатываемой ТОТЭ электроэнергии, которая не используется для питания нагрузки предприятия, что снижает экономическую эффективность применения ТОТЭ. Из показателей экономической эффективности для методики выбора оптимальной установленной мощности ТОТЭ выбран  $C_{\text{дс}}$ . Данный показатель позволяет учесть высокую удельную стоимость 1 кВт установленной мощности ТОТЭ и, как следствие, высокие капитальные затраты в первый год проекта.

### Заключение

Применение ТОТЭ на биогазе является перспективным подходом к повышению качества электроснабжения сельскохозяйственных предприятий и решению проблемы утилизации отходов сельхозпроизводства. ТОТЭ являются энергоэффективными и экологичными источниками, но отличаются низкой маневренностью и высокой удельной стоимостью 1 кВт установленной мощности.

Разработана методика выбора установленной мощности ТОТЭ для применения в системе электроснабжения животноводческого предприятия, которая позволяет определить оптимальную установленную мощность ТОТЭ по критериям экономической и экологической эффективности. Решение

оптимизационной задачи основано на модифицированном методе последовательных уступок, методе поразрядного поиска и разработанной «Базе данных по ТОТЭ».

На примере животноводческого предприятия на 2000 коров выполнена отработка методики и проведено исследование эффективности применения ТОТЭ в системе электроснабжения предприятия. Поиск оптимальной установленной мощности ТОТЭ осуществляется в диапазоне 90 – 525 кВт. Установлено, что по критерию экономической эффективности оптимальная установленная мощность ТОТЭ равна 200 кВт. Показано, что при увеличении капитальных затрат на 10% установленная мощность ТОТЭ может быть увеличена до 250 кВт. Это позволит увеличить объем производства биогаза для работы ТОТЭ на 25 %. Получены зависимости показателей эффективности применения ТОТЭ от установленной мощности ТОТЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение о предоставлении грантов для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук № 075-15-2020-097 (МК-593.2020.8) от 18.03.2020 г.).

#### Библиографический список

1. Стратегия устойчивого развития сельских территорий России на период до 2030 года. Москва. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420251273>.
2. **Соснина, Е.Н.** О применении ТОТЭ на биогазе в системе электроснабжения сельскохозяйственных предприятий / Е.Н. Соснина, А.В. Шалуха, Л.Е. Веселов // Интеллектуальная электротехника, №4 (12). 2020. С. 27-41.
3. **Киселев, И.В.** Повышение энергетической эффективности твердооксидных топливных элементов и обоснование их применения для энергоснабжения потребителей малой мощности. / И.В. Киселев // Автореферат дис. канд. техн. наук, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Москва. 2013.
4. Rebeka Raff, Velimir Golub, Danijel Topić, Goran Knežević, Jurica Perok, "Optimization of the off-grid systems based on renewable energy for power supply in rural areas", in Proc. 2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM).
5. A.V. Shalukho, E.N. Sosnina, and L.E. Veselov, "The Research of Power Supply System Operating Modes with Solid Oxide Fuel Cells on Biogas", International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE), 2018.
6. E. Sosnina, A. Shalukho, I. Lipuzhin, L. Veselov and A. Shashkin, "Power Supply System with Power Plant on Solid Oxide Fuel Cells," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SEST.2019.8849148.
7. **Соснина, Е.Н.** База данных по твердооксидным топливным элементам (ТОТЭ) / Е.Н. Соснина, А.В. Шалуха, Л.Е. Веселов // Свидетельство о гос. регистрации № 2020622076; заявл. № 2020621942 от 21.10.2020. Зарегистрировано 28.10.2020. Правообладатель: НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, L.E. Veselov, R.A. Sharovarov

**METHODOLOGY OF SELECTING THE INSTALLED CAPACITY OF SOFC IN THE COMBINED POWER SUPPLY SOURCE OF LIVESTOCK ENTERPRISE**

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

**Abstract:** The article is devoted to the development of a methodology for selecting the optimal capacity of solid oxide fuel cell (SOFC) power plant which operates on biogas from recycled agricultural waste. The power supply system of a livestock enterprise has been considered. The enterprise is supplied with electricity from a centralized electrical network. A methodology for selecting the optimal SOFC's capacity has been developed according to the economic efficiency criteria and environmental efficiency. The methodology is based on a modified successive concessions method and a bitwise search method. Using a computer program based on Microsoft Excel and a SOFC's database, a study of the effectiveness of SOFC's integration into the power supply system has been carried out.

**Keywords:** agricultural enterprise, biogas, power supply system, solid oxide fuel cell.

**References**

- [1] Strategiiia ustoichivogo razvitiia selskikh territorii Rossii na period do 2030 goda [Strategy for sustainable development of rural areas of Russia for the period up to 2030]. Moscow. 2015. [Online]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420251273> (in Russian).
- [2] E. Sosnina, A. Shalukho, and L. Veselov, "Application of SOFCs on biogas in power supply systems for agricultural enterprises", *Intelligent electrical engineering*, vol. 4, pp. 27-41, 2020.
- [3] I.V. Kiselev. "Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tverdotsidnykh toplivnykh elementov i obosnovanie ikh primeneniia dlia energosnabzheniia potrebiteli maloi moshchnosti [Improving the energy efficiency of solid oxide fuel cells and justifying their use for power supply of low-power consumers]", Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences, FGUP RFIATS-VNIIEF, Moscow. 2013 (in Russian).
- [4] Rebeka Raff, Velimir Golub, Danijel Topić, Goran Knežević, Jurica Perok, "Optimization of the off-grid systems based on renewable energy for power supply in rural areas", in Proc. 2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM).
- [5] A.V. Shalukho, E.N. Sosnina, and L.E. Veselov, "The Research of Power Supply System Operating Modes with Solid Oxide Fuel Cells on Biogas", *International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, 2018.
- [6] E. Sosnina, A. Shalukho, I. Lipuzhin, L. Veselov and A. Shashkin, "Power Supply System with Power Plant on Solid Oxide Fuel Cells," *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SEST.2019.8849148.
- [7] E. Sosnina, A. Shalukho, L. Veselov, "Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Database", Certificate of state registration No. 2020622076; application No. 2020621942 dated 21.10.2020. Registered on 28.10.2020. Copyright holder: NSTU n.a. R. E. Alekseev.

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Н.И. Эрдили, А.С. Власов

## ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБМЕНОМ В ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена проблеме управления энергетическим обменом в виртуальной электростанции (ВиЭС) с разнохарактерными источниками распределенной генерации (РГ). Рассмотрены общие принципы функционирования ВиЭС. Выполнен сравнительный анализ подходов к управлению работой систем с РГ. Установлено, что наиболее эффективными для решения поставленной задачи являются распределенные системы управления. Рассмотрена распределенная система на основе мультиагентного подхода для управления энергообменом в ВиЭС с большой долей РГ, сформирован перечень агентов и разработаны принципы их взаимодействия. С помощью имитационного моделирования в программных комплексах RastWin и Jade проведено исследование эффективности применения мультиагентной системы управления.

**Ключевые слова:** виртуальная электростанция, распределенная генерация, мультиагентная система управления, энергетический обмен

В энергетической стратегии России важная роль отводится распределенной генерации (РГ). Разработки в области устройств управления и защиты электрических сетей, развитие цифровых технологий обуславливают возможность реализации качественно нового подхода к повышению эффективности использования ресурсов РГ, основанного на принципах «энергетического интернета» [1,2].

Концепция энергетического интернета [3, 4] предполагает создание интеллектуальных электротехнических систем с возможностью многостороннего энергетического обмена, как на низком (0,4 кВ), так и на среднем напряжении (10(20) кВ) между распределенными объектами. К системам, функционирующим по данным принципам, относятся виртуальные электростанции (ВиЭС) [5, 6].

ВиЭС представляет собой интеллектуальную электротехническую систему, объединяющую установки РГ, накопители и потребители электроэнергии на основе многостороннего энергетического и информационного обмена для участия в рынке электроэнергии, оказания системных услуг и резервирования. ВиЭС предполагает наличие связи с энергосистемой. Однако технологии ВиЭС также могут быть использованы для повышения эффективности автономных систем электроснабжения с РГ. Примерами успешного внедрения ВиЭС являются: проект Tesla в Южной Австралии [7], проект CONSORT в Тасмании [8], электростанция в Финляндии компании Fortum Corporation [9].

Чем больше распределенных объектов будут объединены в ВиЭС, тем эффективнее могут быть решены задачи бесперебойного электроснабжения потребителей. При этом актуальными становятся вопросы технического объединения и управления совместной работой установок РГ и накопителей на напряжении 0,4 кВ, а также энергообменом между распределенными объектами на напряжении 10(20) кВ.

Перспективное решение задачи технического объединения объектов в ВиЭС связано с развитием технологий твердотельных трансформаторов (ТТ). ТТ представляет собой управляемый полупроводниковый преобразователь [10], позволяющий в реальном времени реализовать функции перераспределения потоков мощности, регулирования параметров электрической энергии, объединения разнородных источников РГ, накопителей и потребителей [11].

Сложность решения задачи управления энергообменом в ВиЭС заключается в различных алгоритмах функционирования распределенных источников РГ, объединенных в единую систему, и необходимости обеспечения многостороннего энергообмена между ними. Применяемые в существующих системах с РГ методы управления эти особенности не учитывают.

Объектом исследования является ВиЭС, объединяющая распределенные объекты с разнохарактерными источниками энергии на напряжении 0,4 и 10 кВ. Цель работы заключается в разработке метода управления энергообменом в ВиЭС на основе мультиагентного подхода и исследовании эффективности его применения.

Таблица 1

Состав исследуемой ВиЭС

№ микросети (энергоячейки)	Место подключения	Параметры трансформатор	Тип и мощность источника РГ	Мощность нагрузки
Микросеть (энергоячейка) М1	шина 2	Т2	-	Н2
	20кВ	20/0,4 кВ	-	200 кВт
Микросеть (энергоячейка) М2	шина 3	Т3	-	Н3
	20кВ	20/0,4 кВ	-	900 кВт
Микросеть (энергоячейка) М3	шина4	ТТ	СЭС	Н4
	20 кВ	20/0,4 кВ	400 кВт	200 кВт
Микросеть (энергоячейка) М4	шина 5	ТТ	СЭС	Н5
	20кВ	20/0,4 кВ	200 кВт	400 кВт
Микросеть (энергоячейка) М5	шина 6	ТТ	ГПУ	Н6
	20кВ	20/0,4 кВ	1500 кВт	700 кВт
Микросеть (энергоячейка) М6	шина 7	ТТ	ЭУ на ТОТЭ	Н7
	20кВ	20/0,4 кВ	300 кВт	500 кВт
Микросеть (энергоячейка) М7	шина 8	ТТ	ДГ	Н8
	20кВ	20/0,4 кВ	600 кВт	200 кВт
Микросеть (энергоячейка) М8	шина 9	ТТ	мини-ТЭЦ	Н9
	20кВ	20/0,4 кВ	500 кВт	100 кВт
Микросеть (энергоячейка) М9	шина 10	ТТ	ВЭУ	Н10
	20кВ	20/0,4 кВ	300 кВт	300 кВт
Микросеть (энергоячейка) М10	шина 11	ТТ	ВЭУ	Н11
	20кВ	20/0,4 кВ	1000 кВт	200 кВт

**Объект исследования**

На рис. 1 представлена структурная схема ВиЭС, объединяющая в единую систему 10 микросетей (энергоячеек) с источниками РГ. Топология

электрической сети 20 кВ является замкнутой и соответствует части тестовой схемы распределительной электрической сети среднего напряжения, используемой СИГРЭ (*CIGRE - Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) для проведения экспериментальных исследований и отработки алгоритмов управления [12]. Каждая энергоячейка представляет собой определенное сочетание источника РГ и нагрузки, объединенных на напряжении 0,4 кВ с помощью ТТ. Состав энергоячеек, тип и параметры источников РГ и нагрузки приведены в табл. 1.

Тип и мощность источников РГ выбраны с целью большей вариативности сценариев работы ВиЭС.

### Разработка метода управления на основе мультиагентного подхода

#### Анализ подходов к управлению функционированием систем с РГ

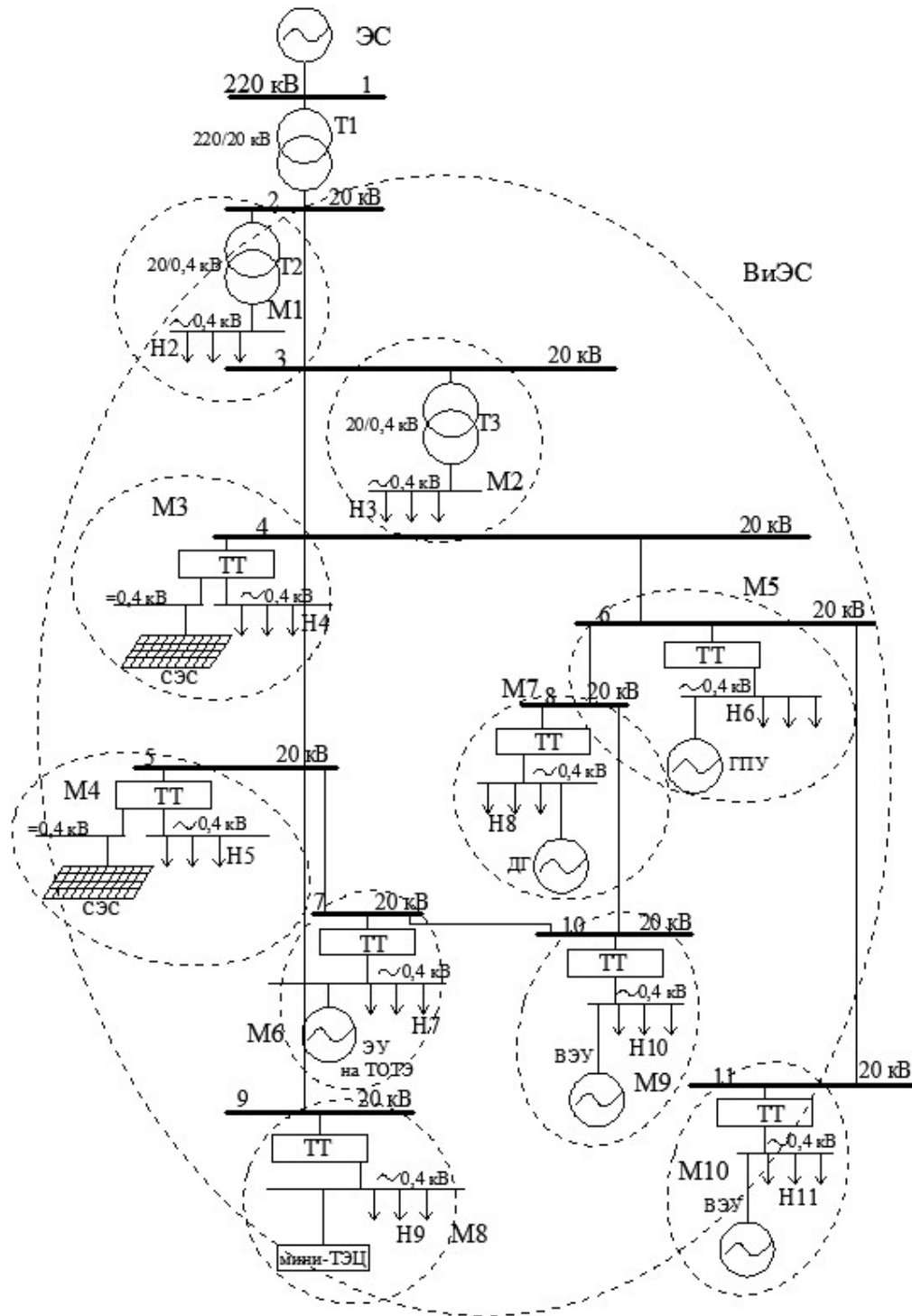
В табл.2 приведены результаты анализа подходов к управлению функционированием систем с РГ.

Таблица 2

Подходы к управлению функционированием систем с РГ

Тип СУ	Централизованная	Децентрализованная	Распределенная
Сложность реализации	Легко	Средне	Сложно
Скорость принятия решений и производительность	Уменьшается при увеличении количества управляемых объектов	Быстро	Быстро
Количество точек управления	Одна или более одной при иерархической структуре	Более одной	Одна или более одной
Надежность системы	Низкая	Высокая	Высокая
Возможность масштабирования	Сложно	Легко	Легко
Организация обмена информацией	Решения принимаются на уровне, отдаленном от пользователя	Решения принимаются на уровне, приближенном к потребителю	Решения принимаются на уровне, приближенном к потребителю

Установлено, что для управления функционированием систем с большим количеством распределенных объектов наиболее эффективными являются децентрализованная и распределенная системы управления. Для управления энергообменом в ВиЭС с большой долей разнохарактерных источников РГ предложено использовать распределенную систему на основе мультиагентного подхода [13].



**Рис. 1. Структурная схема исследуемой ВиЭС:**

M1, M2, ..., M10 – микросеть (энергоячейка); H1, H2, ..., H11 – нагрузка; ЭС – энергосистема; T1, T2, T3 – понижающий трансформатор; ТТ – твердотельный трансформатор; СЭС – солнечная электростанция, ВЭУ - ветроэнергостанция, ГПУ – газопоршневая установка; ЭУ на ТОТЭ – энергоустановка на твердооксидных топливных элементах; ДГ – дизельный генератор

### Описание мультиагентной системы управления

В основе мультиагентной системы (МАС) лежит понятие агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа. Работа МАС основана на взаимодействии агентов друг с другом для принятия решений с учетом получаемой ими информации и приоритетов. Как правило, агенты взаимодействуют согласно модели «Запрос - Ответ – Соглашение/Отказ», которая реализуется в несколько этапов. Взаимодействие агентов должно быть согласованным. Цель работы МАС заключается в достижении агентами своих целей при соблюдении критериев эффективности функционирования системы.

### Разработка агентов и принципов их взаимодействия

Представленные ранее принципы положены в основу разработки МАС для управления энергообменом в ВиЭС на рис.1.

Для реализации МАС введено следующее множество агентов:

$$Ag_i = \langle Ag_{ЦЭС}, Ag_{ВИЭ}, Ag_{МЭС}, Ag_{ТОТЭ}, Ag_{ДЭС}, Ag_{ТЭС}, Ag_H \rangle, \quad (1)$$

где  $Ag_{ЦЭС}$  – агент централизованной сети,

$Ag_{МЭС}$  – агент маневренных электростанций на газу (ГПУ),

$Ag_{ВИЭ}$  – агент солнечных или ветряных электростанций (ВИЭ),

$Ag_{ТОТЭ}$  – агент энергоячеек с ТОТЭ,

$Ag_{ДЭС}$  – агент дизельных электростанций,

$Ag_{ТЭС}$  – агент тепловых электростанций на угле,

$Ag_H$  – агент нагрузки.

Все агенты можно разделить на две группы: агенты генерации и агенты нагрузки. Принято допущение, что генерация от агентов с ВИЭ и ТОТЭ не регулируется, её значение принимается в соответствии с задаваемыми графиками генерации. Агенты для МЭС, ДЭС, ТЭС, ЦЭС устраняют небалансы активной мощности, возникающие в системе, поэтому выдаваемая ими мощность может корректироваться при взаимодействии агентов. Агент ЦЭС может регулировать мощность, получаемую или отдаваемую в ВиЭС. Соответственно данный агент может выступать как агент генерации, так и как агент нагрузки. Параметры агентов нагрузки задаются с помощью графиков электрических нагрузок.

Работа МАС ориентирована на достижение эффективности для каждой микросети (энергоячейки) при соблюдении баланса мощности в ВиЭС в целом. При этом агент генератора оповещает участников МАС об объёме излишков мощности, а агент нагрузки на основе своих критериев связывается с подходящими для него агентами генерации.

В основу работы МАС положены следующие критерии.

Критерий 1 – рейтинг агентов генерации по экологичности ( $R$ ). Каждому агенту генерации присваивается рейтинг экологичности от 1 до 5 (5 -



энергоячейки с ВИЭ, 4 – энергоячейки с МЭС, 3 – энергоячейки с ДЭС, 2 – энергоячейки с ТЭС, 1 – централизованная электрическая сеть). Данный критерий обеспечивает преимущество потребления электроэнергии от источников РГ на основе ВИЭ:

$$Ag_n \rightarrow Ag_{gi} (R \rightarrow \max), \quad (2)$$

где  $Ag_n$  – агент нагрузки;  $Ag_{gi}$  –  $j$ -й агент генерации с соответствующим рейтингом  $R$ .

Критерий 2 - длина линии электропередачи ( $l$ ). При объявлении агентов в МАС задаются длины ЛЭП и точки подключения. Данный критерий позволяет минимизировать потери мощности в сети и обеспечивает приближение производства электроэнергии к месту ее потребления:

$$Ag_n \rightarrow Ag_{gj} (l \rightarrow \min), \quad (3)$$

где  $Ag_{gj}$  –  $j$ -й агент генерации с соответствующей длиной ЛЭП  $l$ .

Критерий 3 - стоимость электрической энергии ( $c$ ). Агенты генерации устанавливают стоимость за производимую электроэнергию при объявлении в МАС, а агенты нагрузки выбирают наиболее дешевую при равенстве критериев 2 и 3:

$$Ag_n \rightarrow Ag_{gj} (c \rightarrow \min), \quad (4)$$

Таким образом, агент нагрузки при выборе агента генерации анализирует систему условий:

$$\begin{cases} Ag_n \rightarrow Ag_{gj} (R \rightarrow \max) \\ Ag_n \rightarrow Ag_{gj} (l \rightarrow \min) , \\ Ag_n \rightarrow Ag_{gj} (c \rightarrow \min) \end{cases} \quad (5)$$

Согласно взаимодействиям агентов разработаны алгоритмы работы агентов генерации и нагрузки (рис. 2).

### **Показатели эффективности применения МАС**

Для оценки эффективности МАС для управления энергообменом в ВиЭС предложено использовать три показателя:

- 1) потери активной мощности в электрической сети 20 кВ ВиЭС ( $\Delta P_\Sigma$ );
- 2) коэффициент использования установленной мощности источников РГ в составе ВиЭС (КИУМ):

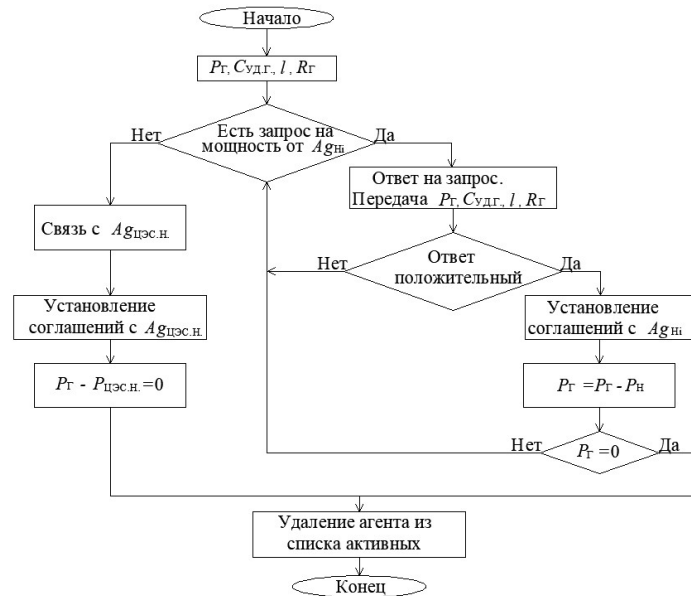
$$\text{КИУМ} = P_{\text{ФАКТ}} / P_{\text{УСТ}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ФАКТ}}$  – фактическая генерируемая мощность источника РГ (для данного установившегося режима),  $P_{\text{УСТ}}$  - установленная мощность источника РГ;

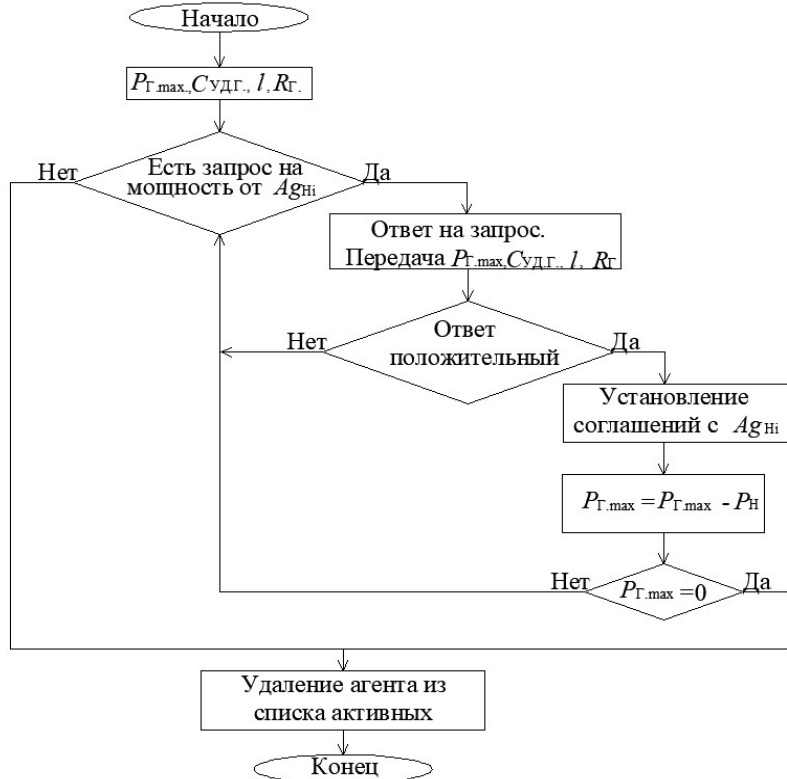
3) Доля использования возобновляемых (экологичных) источников энергии:

$$K_{ВИЭ} = (\Sigma P_{ВИЭ} + \Sigma P_{ТОТЭ}) / \Sigma P_i \quad (7)$$

Чем меньше значение  $\Delta P_{\Sigma}$  и чем выше значения КИУМ и  $K_{ВИЭ}$ , тем более эффективной является работа ВИЭС



а)



б)

Рис. 2. Алгоритмы работы агентов генерации: а – агент генерации с ВИЭ; б – агент с управляемой генерацией

### Разработка имитационных моделей

Для отработки алгоритмов функционирования агентов созданы имитационные компьютерные модели:

- электрической сети ВиЭС с РГ в программном комплексе (ПК) «RastrWin»;
- МАС в ПК «Jade».

Имитационная модель электрической сети ВиЭС с РГ в «RastrWin» предназначена для исследования параметров установившегося режима и расчета показателей эффективности системы (рис. 3).

Имитационная модель МАС в «Jade» позволяет определить установленные между агентами нагрузки и генерации соглашения, на основе чего определить значения потоков электрической мощности в ВиЭС. Диалоговое окно для задания параметров агента генерации показано на рис. 4.

С помощью имитационных моделей проведено исследование эффективности применения МАС для управления энергообменом в ВиЭС с РГ.

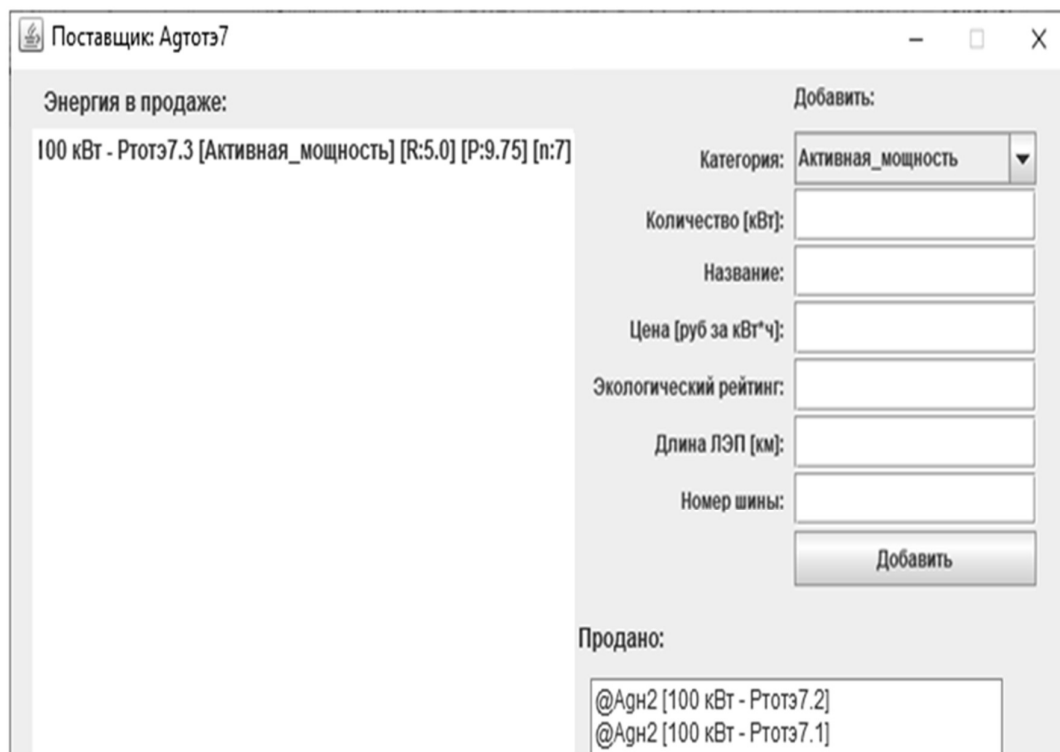


Рис. 4. Диалоговое окно агента генерации в «JADE»

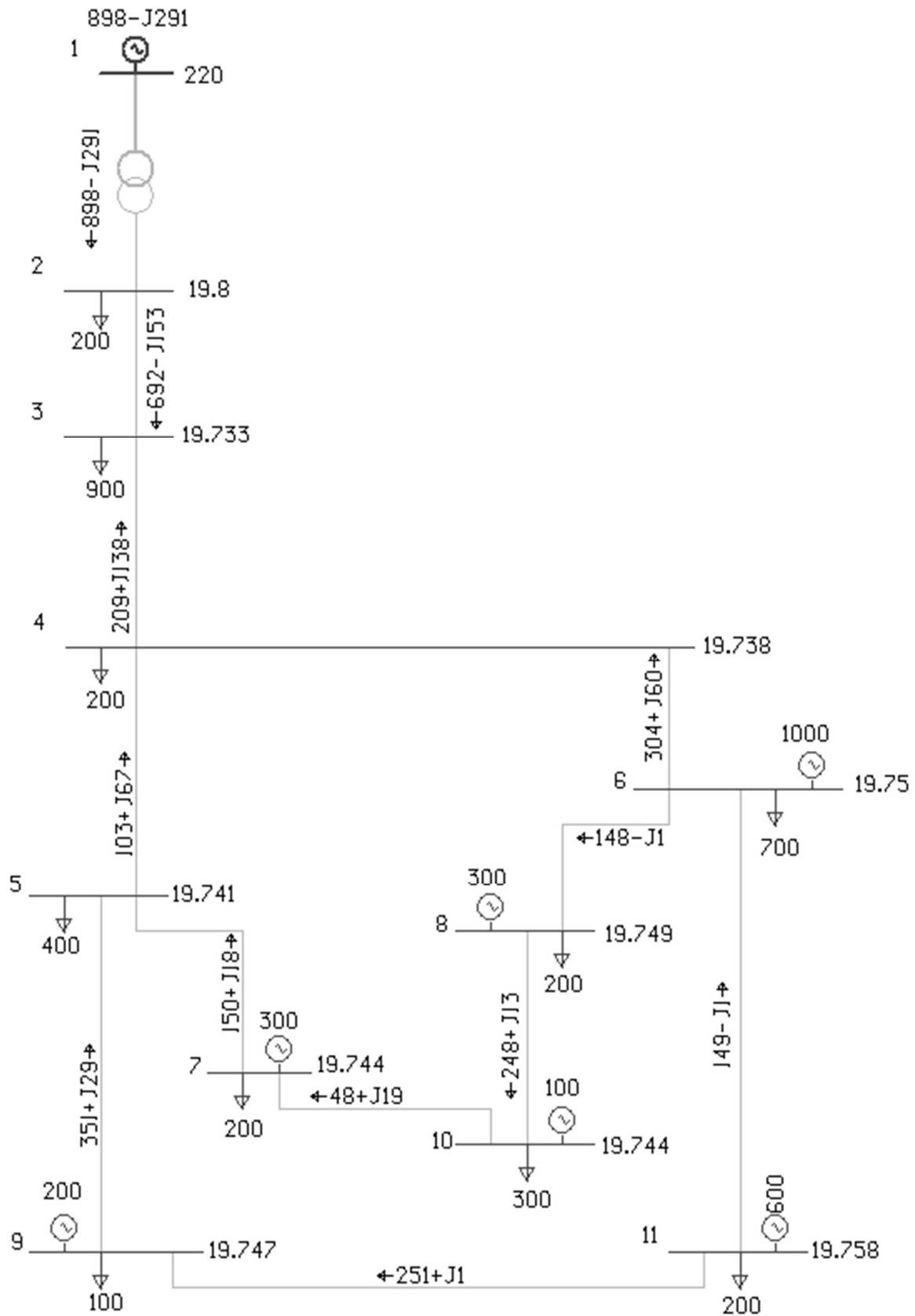


Рис. 3. Имитационная модель электрической сети ВиЭС с РГ

### Исследование эффективности мультиагентной системы управления

Исследование эффективности предложенного подхода основано на сравнении двух вариантов работы системы:

- 1) вариант 1 - нет свободного многостороннего энергообмена между распределенными объектами (небаланс активной мощности покрывается за счет централизованной электрической сети);
- 2) вариант 2 – МАС обеспечивает возможность многостороннего энергообмена по разработанному подходу.

Выполнено моделирование работы системы в установившихся режимах в течение суток с частотой дискретизации в 4 ч. Значения нагрузки и генерации источников РГ для каждого интервала времени (одного часа) были заданы с помощью графиков. На рис. 5 приведены примеры графиков нагрузки и генерации для микросети (энергоячейки) №4.

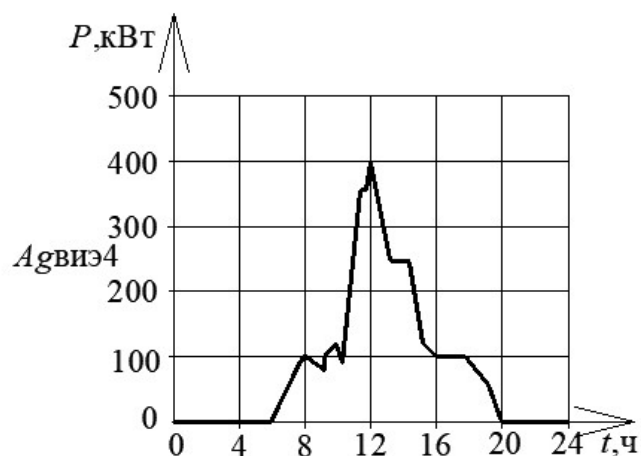
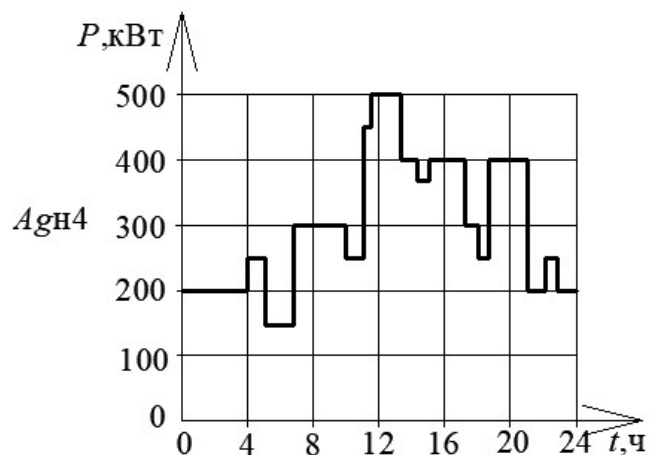


Рис. 5. Примеры графиков нагрузки и генерации для микросети (энергоячейки) №4

В табл. 3 и 4 представлены заданные в «Jade» параметры агентов генерации и агентов нагрузки, которые объявляются при их взаимодействии для заключения соглашений.

Таблица 3

## Параметры агентов генерации

Наименование	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$P_{\text{Г}}$ , кВт	$P_{\text{Г.рег}}$ , кВт	$R$ , о.е.	$C$ , руб/кВт·ч	$l$ , км	№ шины
$Ag_{\text{ЦЭС.Г}}$	220	0	до 25 МВА	1	7,2	7,5	1
$Ag_{\text{ВИЭ4}}$	20	0	-	5	9,75	0	4
$Ag_{\text{ВИЭ5}}$	20	0	-	5	9	0,6	5
$Ag_{\text{МЭС6}}$	20	1000	до 1500	4	7,5	1,3	6
$Ag_{\text{ГОТЭ7}}$	20	300	-	5	9,75	1,1	7
$Ag_{\text{ДЭС8}}$	20	300	до 600	3	9	1,6	8
$Ag_{\text{ТЭС9}}$	20	200	до 500	2	7,5	1,2	9
$Ag_{\text{ВИЭ10}}$	20	100	-	5	10	1,4	10
$Ag_{\text{ВИЭ11}}$	20	600	-	5	6,75	2,7	11

Таблица 4

## Параметры агентов нагрузки

Наименование	$P_{\text{н}}$ , кВт	$P_{\text{н.рег}}$ , кВт	$R_{\text{min}}$ , о.е.	$C_{\text{max}}$ , руб/кВт·ч	$B_{\text{max}}$ , руб	№ шины
$Ag_{\text{ЦЭС.н}}$	0	до 25 МВА	1	15	1500	1
$Ag_{\text{н2}}$	200	-	1	11,25	450	2
$Ag_{\text{н3}}$	900	-	1	12	400	3
$Ag_{\text{н4}}$	200	-	1	13,5	500	4
$Ag_{\text{н5}}$	400	-	4	12,75	450	5
$Ag_{\text{н6}}$	700	-	1	16,5	250	6
$Ag_{\text{н7}}$	200	-	3	13,5	200	7
$Ag_{\text{н8}}$	200	-	2	12,75	600	8
$Ag_{\text{н9}}$	100	-	1	12	350	9
$Ag_{\text{н10}}$	300	-	1	11,25	300	10
$Ag_{\text{н11}}$	200	-	1	10,5	175	11

В качестве стоимости электрической энергии приведены теоретические значения. Отличие стоимости электроэнергии, получаемой от разных источников, позволяет рассмотреть более разнообразное количество участников ВИЭС со своими возможностями и приоритетами.

С помощью имитационного моделирования проведены исследования двух вариантов работы системы в установившемся режиме с 0 до 4 часов. Полученные результаты показателей эффективности представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Потери активной мощности в электрической сети 20 кВ

$N_{\text{нач}}$	$N_{\text{кон}}$	$\Delta P$ без МАС (Вариант 1), кВт	$\Delta P$ с МАС (Вариант 2), кВт
1	2	0,004	0,001
2	3	4,743	0,817
3	4	0,041	0,787
4	5	0,012	0,213
4	6	0,158	1,006
5	7	0,015	0,097
7	10	0,001	0,032
6	8	0,008	0,003
8	10	0,064	0,242
5	9	0,095	0,214
6	11	0,049	0,01
9	11	0,122	0,209
Итого		5,312	3,631

Таблица 6

Показатели эффективности применения МАС

№ шин ы	Тип источника генерации	$P_{\text{уст}}$ , кВт	$P_{\text{ф.1}}$ , кВт	$P_{\text{ф.2}}$ , кВт	КИУМ 1, о.е.	КИУМ <sub>2</sub> , о.е.	$K_{\text{ВИЭ1}}$ , о.е.	$K_{\text{ВИЭ2}}$ , о.е.
4	Солнечная электростанция (ВИЭ)	400	0	0	0	0	0,29	0,29
5	Солнечная электростанция (ВИЭ)	200	0	0	0	0		
6	Газопоршневая электростанция (МЭС)	1500	100 0	150 0	0,667	1,000		
7	Электростанция на биогазе (ТОГЭ)	300	300	300	1	1		
8	Дизельная электростанция (ДЭС)	600	300	600	0,500	1,000		
9	Тепловая электростанция на угле (ТЭС)	500	200	300	0,400	0,600		
10	Ветряная электростанция (ВИЭ)	300	100	100	0,333	0,333		
11	Ветряная электростанция (ВИЭ)	1000	600	600	0,600	0,600		

Из табл. 5 видно, что применение МАС позволило снизить потери активной мощности в электрической сети 20 кВ. Это обусловлено использованием собственной мощности ВиЭС вместо электропотребления из централизованной сети. Наибольшее снижение мощности было достигнуто между узлами 2–3. В

случае работы системы без МАС данное значение велико из-за большой длины ЛЭП и большого объема передаваемой мощности. При работе ВиЭС с МАС объем передаваемой мощности между этими узлами снижается, благодаря использованию объектов с РГ.

Из табл. 6 следует, что применение МАС позволило обеспечить баланс активной мощности в ВиЭС, реализовав при этом всю активную мощность от источников с ВИЭ. При этом остались агенты генерации, потенциально готовые помочь при увеличении нагрузки. Доля использования экологичных источников энергии осталась на том же уровне, что и без МАС в связи с низкой долей генерации ВИЭ и ТОТЭ в рассматриваемый момент времени.

### Заключение

Для управления функционированием виртуальной электростанции с распределенной генерацией предложено использовать распределенную систему на основе мультиагентного подхода.

Рассмотрена ВиЭС, объединяющая 10 микросетей (энергоячеек) с различными типами источников РГ.

Для рассматриваемой ВиЭС разработаны алгоритмы агентов генерации, нагрузки и принципы их взаимодействия. Разработаны и исследованы: имитационная модель электрической сети с распределенной генерацией в ПК «RastrWin», имитационная модель мультиагентной системы управления в «Jade».

Результаты исследований показали, что мультиагентная система управления позволила обеспечить соблюдение баланса активной мощности в электрической сети, реализовав при этом всю активную мощность от источников с ВИЭ. В результате первой итерации мультиагентная система управления позволила снизить потери мощности в электрической сети и увеличить коэффициент использования установленной мощности энергоустановок, входящих в ее состав.

### Библиографический список

1. **Лоскутов, А. Б.** Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9–27.
2. **Лоскутов, А. Б.** От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны / А. Б. Лоскутов, А.Л. Куликов, П.В. Илюшин // Электричество. – 2020. - №12. – С.14-30.
3. План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [Электрон. ресурс]. - URL: [https://www.rvc.ru/nti/roadmaps/dk\\_energynet\\_new.pdf](https://www.rvc.ru/nti/roadmaps/dk_energynet_new.pdf) (дата обращения: 10.05.2021).
4. Архитектура интернета энергии [Электрон. ресурс]. - URL: <https://medium.com/internet-of-energy/87224da0b72b> (дата обращения: 15.05.2021).
5. Sosnina E., Chivenkov A., Shalukho A., Shumskii N. Power Flow Control in Virtual Power Plant LV Network // Int. J. Renew. Energy Res.8. 2018. С. 328–335.
6. **Соснина, Е.Н.** Оптимизация электротехнического комплекса виртуальной электростанции с источниками распределенной генерации / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, А.Ю. Кечкин // Фёдоровские чтения – 2017: материалы междунар. научно-практической конференции МЭИ – М: Изд. дом МЭИ, 2017. С. 312-320.
7. Tesla's virtual power plant has proven its worth. [Электронный ресурс]. - URL:



- <https://hightech.plus/2020/04/09/virtualnaya-elektrostanciya-tesla-dokazala-svoyu-effektivnost> (дата обращения: 15.05.2021).
8. Virtual power plants and real kilowatts [Электронный ресурс]. - URL: [https://atomicexpert.com/virtual\\_power\\_station](https://atomicexpert.com/virtual_power_station) (дата обращения: 16.05.2021).
  9. Digital energy and virtual power plants. [Электронный ресурс]. - URL:<https://www.elec.ru/articles/cifrovaya-energetika-i-virtualnye-elektrostancii/> (дата обращения: 16.05.2021).
  10. Kolar J.W., Huber J.E. Solid-State Transformers: Key Design Challenges, Applicability, and Future Concepts. – APEC 2016 [Электрон. ресурс] URL: [www.pes-publications.ee.ethz.ch](http://www.pes-publications.ee.ethz.ch) (Дата обращения 17.05.2021).
  11. Shamsuddin M.A., Rojas F. Solid State Transformers: Concepts, Classification, and Control. *Energies* 2020. - 13(9), 2319.
  12. Тестовые схемы [Электронный ресурс]. - URL: [http://energy.komisc.ru/dev/test\\_cases#Link\\_3](http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3) (дата обращения: 17.05.2021).
  13. **Фишов, А.Г.** Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях / Фишов А.Г., Карджаубаев Н.А. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. № 6. – С. 183 – 195

E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, N.I. Erdili, A.S. Vlasov

## ENERGY EXCHANGE MANAGEMENT ISSUES IN A VIRTUAL POWER PLANT WITH DISTRIBUTED GENERATION

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

**Abstract:** The article is devoted to the problem of energy exchange control in a virtual power plant (VPP) with various sources of distributed generation (DG). The general principles are considered of VPP functioning. A comparative analysis of approaches is carried out to the control of the operation of systems with DG. It was found that the most effective for solving the problem are distributed control systems. A distributed system based on a multi-agent approach is considered for managing energy exchange in a VPP with a large share of DG, a list of agents is formed and the principles of their interaction are developed. A study of the effectiveness of the use of a multi-agent control system was carried out with the help of simulation modeling in the RastrWin and Jade software complexes.

**Key words:** virtual power plant, distributed generation, multi-agent control system, energy exchange

### References

- [1] A.B. Loskutov, “Problemi perehoda electroenergetiki na cifrovie tehnologii”, *Intellektualnaya electrotehnika*, no. 1, pp. 9–27, 2018 (in Russian)
- [2] A.B. Loskutov, A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin “Ot plana GOELRO k cifrovizacii electroenergeticheskogo kompleksa strani”, *Electrichestvo*, no. 12, pp. 14–30, 2020 (in Russian)
- [3] Action plan (“road map”) “EnergyNet”. National technology initiative [Online]. Avaiabe at: [https://www.rvc.ru/nti/roadmaps/dk\\_energynet\\_new.pdf](https://www.rvc.ru/nti/roadmaps/dk_energynet_new.pdf) (Accessed: 10.05.2021).
- [4] The internet of energy architecture [Online]. Avaiabe at: <https://medium.com/internet-of-energy/87224da0b72b> (Accessed: 15.05.2021).
- [5] E. Sosnina, A. Chivenkov, A. Shalukho, N. Shumskii Power Flow Control in Virtual Power Plant LV Network // *Int. J. Renew. Energy Res.* no. 8, pp. 328–335, 2018
- [6] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, A. Yu. Kechkin, “Optimizaciya electrotehnicheskogo kompleksa virtualnoy electrostancii s istochnikami raspredelennoy generacii” “*Fedorovskiye chteniya [Fedorov readings]*”. Moscow: MEI, pp. 312–320, 2017 (in Russian)
- [7] Tesla's virtual power plant has proven its worth [Online]. Avaiabe at: <https://hightech.plus/2020/04/09/virtualnaya-elektrostanciya-tesla-dokazala-svoyu-effektivnost> (Accessed: 15.05.2021).
- [8] Virtual power plants and real kilowatts [Online]. Avaiabe at: [https://atomicexpert.com/virtual\\_power\\_station](https://atomicexpert.com/virtual_power_station) (Accessed: 16.05.2021).
- [9] Digital energy and virtual power plants [Online]. Avaiabe at: <https://www.elec.ru/articles/cifrovaya-energetika-i-virtualnye-elektrostancii/> (Accessed: 16.05.2021).
- [10] J.W. Kolar, J.E. Huber Solid-State Transformers: Key Design Challenges, Applicability, and Future Concepts. – APEC 2016 [Online]. Avaiabe at: [www.pes-publications.ee.ethz.ch](http://www.pes-publications.ee.ethz.ch) (Accessed: 17.05.2021).
- [11] M.A. Shamshuddin, F. Rojas Solid State Transformers: Concepts, Classification, and Control. *Energies*, no. 13(9), 2319, 2020
- [12] Тестовые схемы [Online]. Avaiabe at: [http://energy.komisc.ru/dev/test\\_cases#Link\\_3](http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3) (Accessed: 17.05.2021).
- [13] A.G. Fishov, N.A. Karjaubaev, “Decentralizovannoe multiagentnoe regulirovanie napryajeniya v electriceskikh setyah”, *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, T. 22, no. 6, pp. 183–195, 2018 (in Russian)

УДК620.91

DOI: 10.46960/44170389\_2021\_415

В.А. Тремясов<sup>1</sup>, Я.Е. Зограф<sup>1</sup>

## МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Сибирский федеральный университет

**Аннотация:** В статье описана разработанная авторами математическая модель надежности аккумуляторной батареи в составе систем генерации с возобновляемыми источниками энергии различных конфигураций. Определены показатели надежности и показано влияние емкости аккумулялирования электроэнергии на вероятность потери нагрузки в автономной системе электроснабжения.

**Ключевые слова:** надежность, ветро-солнечная генерация, аккумуляторная батарея, марковская модель.

Использование накопителей энергии в автономных ветро-солнечных системах позволяет сгладить дисбаланс генерируемой и потребляемой мощности, обеспечивая тем самым стабильность работы системы. В автономных системах электроснабжения (АСЭС) целесообразно использовать аккумуляторные батареи (АБ), которые выгодно отличаются от других типов накопителей энергии, имея преимущество хороших эксплуатационных характеристик и относительно невысокой стоимости. Варианты компоновки накопительных звеньев АСЭС формируются в зависимости от состава генерирующего оборудования и режимов его работы. Например, в фотоэлектрических установках с ярко выраженными циклическими режимами заряда/разряда необходимо использовать АБ типа *OPzS* (заливные свинцово-кислотные батареи корпусного типа), *FLA* (заливные свинцово-кислотные АБ), *LCB* (свинцово-угольные АБ) или *LIB* (литий-ионные АБ). В системах генерации с ветряными турбинами рекомендуется использовать АБ типа *OPzS*.

В работах [1–7] приведены методы оценки надежности для гибридных ветровых и солнечных систем с аккумулялированием. В этих работах все сфокусировано на использовании приближенных аналитических методов. Основным недостатком этих подходов являются модели надежности АБ, представленные двумя состояниями: отказ и работа.

Целью данной статьи является разработка математической модели надежности АБ, работающей параллельно с ветроэнергетическими установками (ВЭУ), фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) и дизель-генераторами (ДГ) и отражающей последовательность исправных и неисправных состояний АБ.

Основные вероятностные показатели надежности генерирующих источников, используемые в работе: коэффициент вынужденного простоя (*FOR*), о.е.; интенсивность отказа ( $\lambda$ ), 1/год; интенсивность восстановления

( $\mu$ ), 1/ч; средняя наработка до отказа ( $MTTF$ ), ч; среднее время ремонта ( $MTTR$ ), ч; ожидаемая потеря нагрузки ( $LOLE$ ), ч/год.

$LOLE$  – оценка математического ожидания числа часов за расчетный интервал времени, для которых пик нагрузки превышает мощность, выдаваемую генерирующими агрегатами в АЭС.

Показателем, связанным с надежностью и аккумулярованием электроэнергии является ожидаемое энергоснабжение устройства аккумулярования энергии ( $EESBSF$ ), кВт·ч/год.

Объектом исследования является автономная энергосистема. Предмет исследования – метод анализа надежности АБ, входящей в состав АЭС.

Предложена марковская модель надежности АБ, основанная на предположении, что каждая батарея в группе последовательно находится в исправных и неисправных состояниях. Диаграмма мультисостояний АБ приведена на рис. 1.

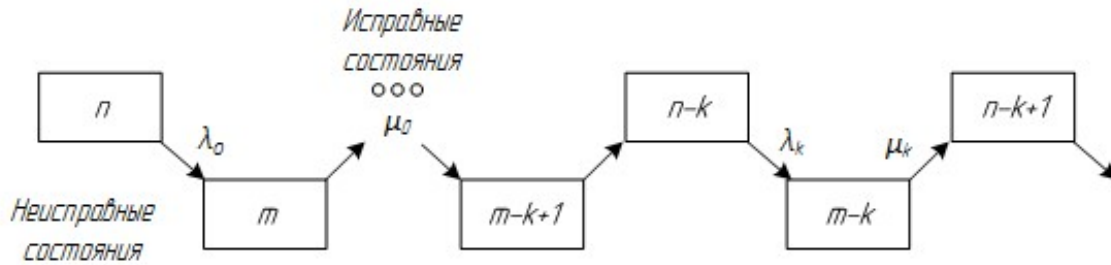


Рис. 1. Марковская модель мультисостояний АБ

Используя известные методы, можно получить дифференциальные уравнения состояний этой системы АБ

$$\frac{dP_{n-k}(t)}{dt} = -\lambda_k P_{n-k}(t) + \mu_{k-1} P_{m-k+1}(t), \quad (1)$$

$$\frac{dP_{m-k}(t)}{dt} = -\mu_k P_{m-k}(t) + \lambda_k P_{n-k}(t). \quad (2)$$

Начальные условия имеют вид:  $P_{m-k}(0) = 0, k = 1, 2, 3, \dots, P_n(0) = 0$ .

Решение уравнений (1) и (2) для случая постоянных значений  $\lambda_k = \lambda = \text{const}$  и  $\mu_k = \mu = \text{const}$  приведено в работе [8]. Однако легко убедиться, что подобное ограничение, налагаемое на  $\lambda_k$  и  $\mu_k$ , не всегда соответствует реальной действительности. Более общее решение можно получить, используя любой из методов численного интегрирования, например метод Эйлера или метод Рунге-Кутты. После того, как будут получены вероятности всех состояний, коэффициент вынужденного простоя группы АБ определяется с помощью формулы

$$\text{FOR} = \sum_{k=0}^{k_{\max}} P_{m-k}(t). \quad (3)$$

Поскольку вероятности зависят от выбранного значения  $k_{max}$ , при большом значении  $k_{max}$  можно получить значение  $FOR$ , близкое к истинному.

В статье в качестве накопителя электроэнергии предложено использовать АБ типа *OPzS* емкостью  $1000 \text{ А} \cdot \text{ч}$  и с номинальным напряжением  $2 \text{ В}$ . АБ этого типа имеют от 1500 до 2000 циклов заряда-разряда при глубине разряда 80 %.

В работе рассматривается стандартная схема подключения АБ на  $48 \text{ В}$ , что соответствует 24 аккумуляторным батареям, соединенным последовательно, общей емкостью  $48 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . К этой группе АБ могут подключаться другие сборки аналогичной емкости.

На основе метода [9] исследована надежность трех основных конфигураций АСЭС (табл.1) с различными источниками генерации, емкостями средств аккумулирования и показателями надежности энергоисточников (табл.2). Структурная схема АСЭС приведена на рис. 2.

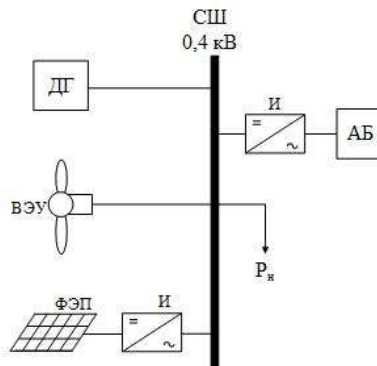


Рис. 2. Структурная схема АСЭС

Таблица 1

Конфигурации АСЭС, число и мощности генерирующих агрегатов

Вариант конфигурации системы	Тип генерации и/или аккумулирования при пиковой нагрузке в 40 кВт	Количество генераторов и/или групп аккумуляторов	Производительность генераторов и/или аккумуляторов, кВт/кВт·ч
1	ДГ	2	20
	ФЭП	2	30
	АБ	6	288
2	ДГ	2	20
	ВЭУ	1	30
	ФЭП	1	30
	АБ	6	288

Окончание табл. 1

3	ДГ	2	20
	ВЭУ	2	30
	АБ	6	288

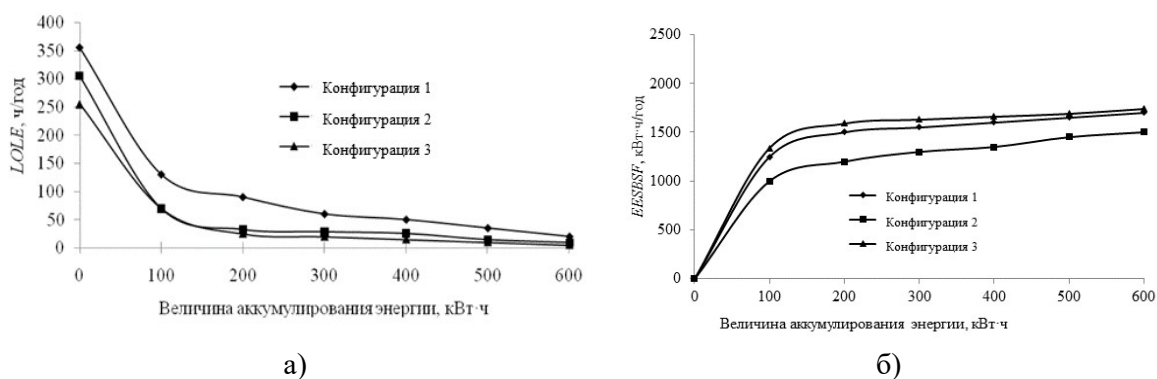
Из данных рис. 3,а следует, что добавление мощности аккумулирования энергии значительно улучшает надежность АЭС независимо от типа источников энергии, установленных в системе. Ожидаемая энергия, поставляемая в средства аккумулирования (*EESBSF*), показана на рис. 3,б в зависимости от величины аккумулирования энергии для трех базовых конфигураций.

Таблица 2

Данные о надежности энергоисточников в АЭС [10]

Вариант конфигурации системы	Тип генерации и/или аккумулирования	Коэффициент вынужденного простоя <i>FOR</i> , %	Интенсивность отказа $\lambda$ , 1/год	Среднее время до отказа генерирующего агрегата <i>MTTF</i> , ч	Среднее время на ремонт <i>MTTR</i> , ч
1	ДГ	5	9,2	950	50
	ФЭП	3	3	2910	90
	АБ	х	0,003	х	13
2	ДГ	5	9,2	950	50
	ВЭУ	4	4,6	1920	80
	ФЭП	3	3	2910	90
3	ДГ	5	9,2	950	50
	ВЭУ	4	4,6	1920	80
	АБ	х	0,003	х	13

Примечание: х – данные отсутствуют



**Рис. 3. Влияние величины аккумулирования энергии на: а) вероятность потери нагрузки (*LOLE*); б) ожидаемое энергоснабжение объекта аккумулирования энергии (*EESBSF*)**

Проведенные исследования показали, что минимальная выгода получается, если величина аккумулирования энергии превышает определенное

значение (примерно 400 кВт·ч). Поэтому нецелесообразно пытаться улучшить надежность АСЭС, используя дополнительные средства аккумулирования энергии для системы, без учета влияния возобновляемых источников энергии.

В ходе выполнения исследований впервые предложена и реализована модель надежности аккумуляторной батареи, входящей в состав АСЭС.

Полученные в работе решения могут быть использованы на практике при проектировании АСЭС на базе возобновляемых источников энергии.

### Библиографический список

1. Perzhabinsky S. M. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine / S. M. Perzhabinsky, D. N. Karanov, A. A. Achitaev // Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies. – 2021. – № 14(1). – P. 55–71.
2. Abouzahr I., Ramakumar R. «Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, № 3, 1990, pp. 445–451.
3. Abouzahr I., Ramakumar R., «Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems: A closed form solution approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, № 1, 1991, pp. 1–8.
4. Gavanidou E. S., Bakirtzis A. G., Dokopoulos P. S. «A probabilistic method for the evaluation of the performance of wind-diesel energy systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, №. 3, 1992, pp. 418–425.
5. Karaki S. H., Chedid R.B., Ramadan R. «Probabilistic performance assessment of wind energy conversion systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, № 2, 1999, pp. 217–224.
6. Karaki S. H., Chedid R. B. and Ramadan R., «Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, № 3, 1999, pp. 766–772.
7. Bagen. Reliability and Cost/Worth Evaluation of Generating Systems Utilizing Wind and Solar Energy PhD. thesis, University of Saskatchewan, 2005.
8. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем: пер с англ. / Б. Диллон, Ч. Синг. - М.: Мир, 1984. – 318 с.
9. Тремясов, В.А. Вероятностный метод анализа надежности автономного энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко // Материалы IX Межд. НТК «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», 2019, Благовещенск, Россия. Благовещенск: АмурГУ, 2019. С.50-55.
10. Тремясов, В.А. Теория надежности в энергетике. Надежность систем генерации, использующих ветровую и солнечную энергию: учеб. пособие / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 164 с.

V.A. Tremyasov<sup>1</sup>, Ya.E. Zograf<sup>1</sup>

## RELIABILITY MODEL OF A STORAGE BATTERY IN A GENERATION SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Siberian Federal University

**Abstract:** The article describes a mathematical model developed by the authors for the reliability of a storage battery as part of generation systems with renewable energy sources of various configurations. The indicators of reliability are determined and the influence of the storage capacity of electricity on the probability of loss of load in the autonomous power supply system is shown.

**Key words:** reliability, wind-solar generation, storage battery, Markov model.

### References

- [1] Perzhabinsky S. M. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine / S. M. Perzhabinsky, D. N. Karamov, A. A. Achitaev // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – № 14(1). – P. 55–71.
- [2] Abouzahr I., Ramakumar R. «Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, № 3, 1990, pp. 445–451.
- [3] Abouzahr I., Ramakumar R., «Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems: A closed form solution approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, № 1, 1991, pp. 1–8.
- [4] Gavanidou E. S., Bakirtzis A. G., Dokopoulos P. S. «A probabilistic method for the evaluation of the performance of wind-diesel energy systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, № 3, 1992, pp. 418–425.
- [5] Karaki S. H., Chedid R.B., Ramadan R. «Probabilistic performance assessment of wind energy conversion systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, № 2, 1999, pp. 217–224.
- [6] Karaki S. H., Chedid R. B. and Ramadan R., «Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, № 3, 1999, pp. 766–772.
- [7] Bagen. Reliability and Cost/Worth Evaluation of Generating Systems Utilizing Wind and Solar Energy PhD. thesis, University of Saskatchewan, 2005.
- [8] Dillon B., Sing Ch. Engineering methods for ensuring the reliability of systems: Translate from English. M.: Mir, 1984. -- 318 p.
- [9] Tremyasov V.A., Krivenko T.V. A probabilistic method for analyzing the reliability of an autonomous power complex based on renewable energy sources. Proceedings of the IX Int. STC "Energy: management, quality and efficiency of energy resources use", 2019, Blagoveshchensk, Russia. Blagoveshchensk: Amur State University, 2019.
- [10] Tremyasov V.A., Krivenko T.V. Reliability theory in power engineering. Reliability of generation systems using wind and solar energy: textbook. allowance. Krasnoyarsk: Sib. Feder. un-ty, 2017. -- 164 p.



Е. А. Цыденов, А. В. Прохоров

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С БОЛЬШОЙ ДОЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**Аннотация:** В данной работе рассматривается алгоритм для адаптивной настройки системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности. Предлагаемый подход позволяет выполнять расчет коэффициентов долевого участия электростанций в соответствии с указанными критериями в режиме онлайн. Тестирование алгоритма произведено на модели энергосистемы мощностью 60 ГВт, состоящей из 464 узла и 742 ветви.

**Ключевые слова:** регулирование перетоков, коэффициенты долевого участия, ограничение перетоков, системы управления

Увеличение доли источников энергии с быстро изменяющимся характером работы влечет за собой появление новых требований к функционированию электроэнергетических систем (ЭЭС), что приводит к необходимости модифицировать существующие алгоритмы управления. В настоящее время некоторые энергообъединения способны обеспечивать от 40% до более чем 100% потребителей в течение нескольких часов ежедневно с помощью солнечных и ветряных электростанций. При таких условиях эффективное использование активной мощности, вырабатываемой с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ), становится одной из приоритетных задач управления.

Одним из способов решения данной задачи является совершенствование рынка системных услуг и привлечение ВИЭ к участию в автоматическом регулировании частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ). В связи с этим многие исследователи сфокусировали свое внимание на повышении качества и эффективности работы системы АРЧМ в быстро изменяющихся условиях функционирования энергосистем, а также при наличии высокой доли неопределенности [1–3].

Существует множество работ, как [4] и [5], где авторы утверждают, что существующий ПИД-регулятор обладает недостаточной адаптивностью к изменяющимся условиям функционирования энергосистемы, а также не способен учитывать ее нелинейный характер и ограничения. В связи с этим сформировались направления исследований, связанные с разработкой адаптивных регуляторов, а также созданием алгоритмов для адаптивной настройки ПИД-регулятора. Множество методик было предложено для улучшения системы АРЧМ, среди которых искусственные нейронные сети, оптимизационные алгоритмы, нечеткая

логика, управление по прогнозным моделям и другие. Помимо этого, исследователи предлагают более сложные решения, например, распределенные системы управления, подразумевающие изменение структуры системы АРЧМ для повышения ее гибкости, масштабируемости и эффективности. Таким образом, описанные выше методики позволяют улучшить систему АРЧМ для обеспечения соответствия принципам её работы новым требованиям, однако для этого, как правило, необходимы и предлагаются значительные модификации или перестроение существующих систем АРЧМ.

Модернизация АРЧМ также возможна посредством совершенствования блока расчета и задания коэффициентов долевого участия электростанций (КДУ), являющегося стандартным функциональным звеном системы АРЧМ. В настоящее время методики расчета КДУ отличаются в диспетчерских центрах разных стран, однако среди них можно выделить общий подход для каждой задачи управления:

- при регулировании частоты и перетоков активной мощности КДУ рассчитывается онлайн с учетом экономических факторов, а также технологических параметров электростанций (резервы вторичного регулирования, скорость изменения мощности и др.);

- при ограничении перетока в сечении или ограничении токовой загрузки линии КДУ определяются в соответствии с результатами анализа параметров режима энергосистемы, а именно анализа эффективности электростанций в регулировании перетока в контролируемом сечении/линии, который выполняется офлайн, так как требует большого количества расчетов установившегося режима.

Параметры, влияющие на значение КДУ, зависят друг от друга и изменяются в процессе эксплуатации энергосистемы, поэтому для повышения эффективности управления перетоками в данной работе предлагается осуществлять расчет коэффициентов долевого участия в режиме онлайн.

Для онлайн расчета значений КДУ с учетом технологических, экономических и режимных параметров предлагается использовать алгоритм, структура которого представлена на рис. 1.

Принцип выполнения расчетов заключается в следующем. Оцененные значения схемно-режимных параметров ЭЭС ( $TM'$ ) поступают на вход компонента для расчета электрического режима. Рассчитанные значения перетоков мощности в контролируемых связях или другие необходимые режимные параметры ( $P_C$ ) поступают на вход алгоритма оптимизации, который изменяет мощность регулирующих электростанций ( $P_{PЭС}$ ).

Объемы резервов вторичного регулирования, стоимость выработки электроэнергии и другая необходимая для оптимизации информация ( $\Delta P_{PEЗ}$ ) поступает из базы данных реального времени SCADA системы диспетчерского центра. Оптимизационный алгоритм осуществляет поиск оптимальных значений задания внеплановой мощности электростанций ( $\Delta P_{PЭС}$ ) в соответствии с целевой функцией, которая определяется в зависимости от задачи управления и может содержать в себе экономические параметры, характеристики оборудования и другие параметры. Найденные значения используются для расчета КДУ, которые впоследствии поступают в систему АРЧМ

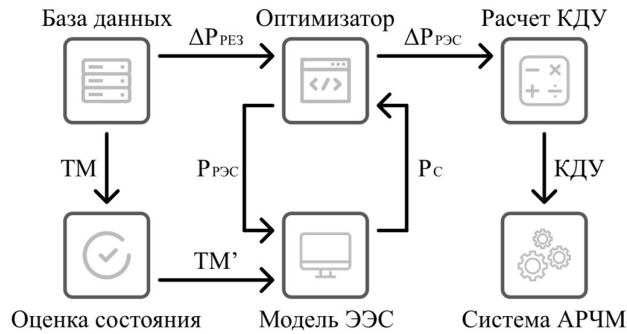


Рис. 1. Алгоритм расчета КДУ электростанций

Тестирование работы алгоритма осуществляется путем расчета КДУ электростанций для задачи автоматического ограничения перетоков активной мощности. Для этого используется упрощенная модель части энергосистемы России, которая состоит из 464 узлов и 742 ветвей. Состав генерации представлен тепловыми и гидравлическими электростанциями, суммарная мощность которых составляет 60 ГВт. Упрощенная схема рассматриваемого энергорайона, контролируемое сечение и регулирующие электростанции изображены на рисунке 2.

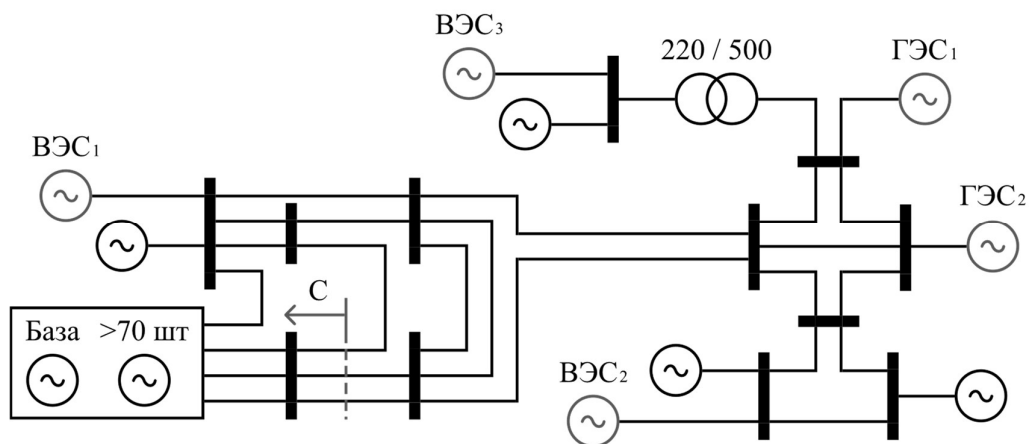


Рис. 2. Схема рассматриваемого энергорайона

Для оценки работы алгоритма была сформирована серия режимов энергосистемы на основе архивной телеметрической информации за 24 часа с интервалом в 5 минут, что позволило приблизить условия проведения экспериментов к реальному функционированию энергосистемы.

В литературе нет примеров расчета КДУ для задачи ограничения перетоков активной мощности, поэтому в данной работе предлагается использовать следующую целевую функцию:

$$f(P_{РЭС}) = k_1 \cdot |\Delta P_C| + \|k_P \circ \Delta P_{РЭС} \wedge n\|_1 \quad (1)$$

Оптимизационный алгоритм стремится минимизировать значение целевой функции (1), изменяя мощность регулирующих электростанций  $P_{PЭС}$ . Первое слагаемое функции штрафует алгоритм за отклонение текущего значения перетока мощности в сечении  $\Delta P_C$  от установленного. Второе слагаемое учитывает объемы резервов вторичного регулирования  $k_P$  и заставляет алгоритм использовать наиболее эффективные электростанции, минимизируя отклонения мощностей РЭС  $\Delta P_{PЭС}$  от исходного значения. Коэффициент  $n$  необходим для распределения управляющего воздействия от системы АРЧМ между электростанциями, что позволяет более равномерно использовать резервы вторичного регулирования. Весовые коэффициенты  $k_I$  определяют важность каждого критерия и могут быть настроены в соответствии с особенностями энергосистемы и требованиями к управлению

Предложенная целевая функция может быть адаптирована к любой задаче управления системы АРЧМ путем добавления необходимых критериев: стоимость выработки, скорость изменения мощности и другие. Помимо использования информации об эффективности электростанций также можно учитывать другие режимные параметры, например, токовую загрузку линий, что позволит повысить гибкость системы АРЧМ за счет анализа загрузки смежных линий и предотвращения их перегрузки. Таким образом, предложенный подход позволяет анализировать влияние управляющих воздействий системы АРЧМ не только на контролируемое сечение или линию, но и на всю энергосистему в целом.

Далее рассматривается работа предложенного алгоритма при наличии в энергосистеме источников энергии с быстро изменяющимся характером работы, которые участвуют во вторичном регулировании частоты и перетоков мощности. Для этого в существующей модели энергосистемы часть традиционных источников энергии была заменена на ветроэлектростанции ВЭС<sub>1-3</sub>, мощность которых 600 МВт, 600 МВт и 300 МВт соответственно. Также в регулировании участвуют гидроэлектростанции ГЭС<sub>1-2</sub>. Резервы гидроэлектростанций в большинстве случаев определяются геологическими и климатическими условиями, поэтому их объем изменяется незначительно в течение суток. Таким образом, в данной работе резервы ГЭС принимаются постоянными и равными 50 МВт на загрузку и разгрузку.

График изменения выработки данных станций представлен на рис. 3 и соответствует данным о характере работы ветряных источников энергии (ВЭС), согласно данным Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии [6]. Методика расчета объема резервов вторичного регулирования не так важна в рамках данной работы, сколько его переменный характер, поэтому при расчетах принимается, что 10% от текущей выработки активной мощности предоставляется для осуществления вторичного регулирования.

Результаты расчета КДУ, представленные на рис. 4, показали, что из-за переменного характера работы ветроэлектростанций значения КДУ непрерывно изменяются. В случае офлайн расчета значения коэффициентов долевого участия становятся зависимыми от прогноза выработки ветряных электростанций,

который выполняется заранее и, как правило, является не очень точным. Это доказывает необходимость осуществления расчета КДУ в режиме онлайн при подключении к системе АРЧМ источников энергии с быстро изменяющимся характером работы.

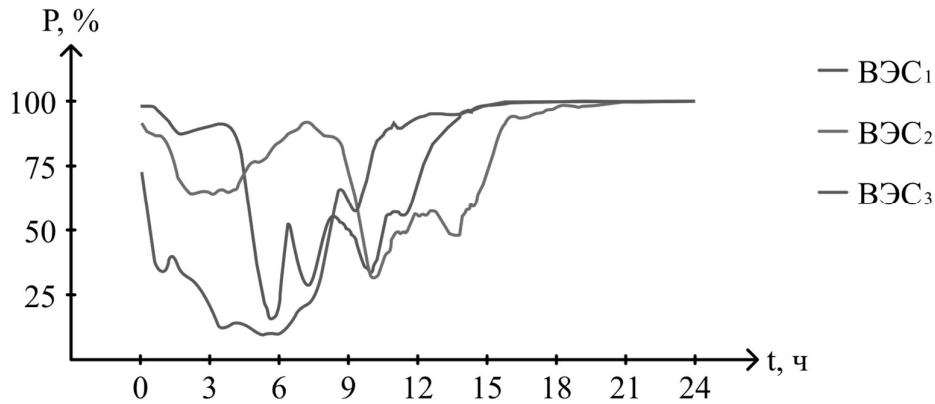


Рис. 3. График выработки ветряных электростанций в течение суток

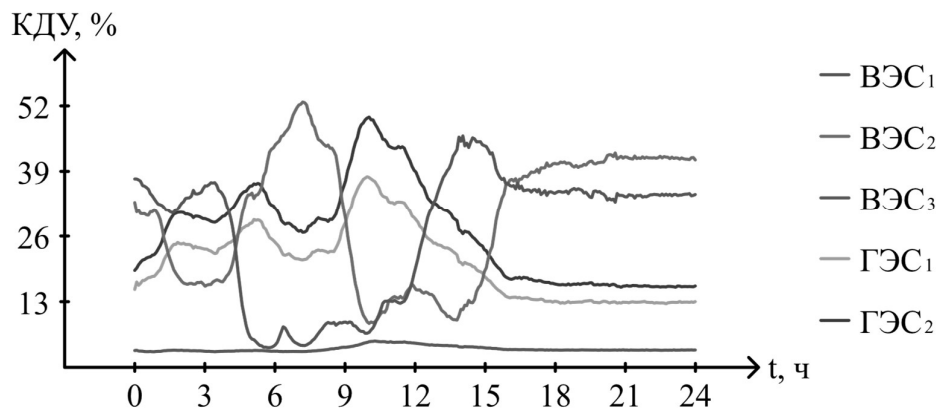


Рис. 4. Рассчитанные значения КДУ при подключении ветроэлектростанций к системе АРЧМ

Среднее количество расчетов установившегося режима в данном эксперименте составило 15890, а время расчета одного режима рассматриваемой модели энергосистемы методом Ньютона–Рафсона составляет 12 мс при используемых в работе программных и аппаратных средствах. Таким образом, теоретическое время расчета КДУ составляет 190 секунд при однопоточной реализации алгоритма.

Полученного быстродействия алгоритма может быть недостаточно для эффективного управления электростанциями в энергосистемах с большой долей возобновляемых источников энергии или при увеличении количества регулирующих электростанций. Поэтому дальнейшим направлением работы является анализ способов повышения быстродействия предложенного алгоритма, а

именно исследование и настройка алгоритмов оптимизации, а также тестирование методов повышения скорости расчета установившегося режима.

#### Библиографический список

1. X. Miao, M. Ilić and Q. Liu, "Enhanced Automatic Generation Control (E-AGC) for Electric Power Systems with Large Intermittent Renewable Energy Sources," 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1-5.
2. R. D. Masiello and W. P. Katzenstein, "Adapting AGC to manage high renewable resource penetrations," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6.
3. D. Apostolopoulou, A. D. Domínguez-García and P. W. Sauer, "An Assessment of the Impact of Uncertainty on Automatic Generation Control Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 2657-2665, July 2016.
4. D. Kler, V. Kumar and K. P. S. Rana, "Optimal integral minus proportional derivative controller design by evolutionary algorithm for thermal-renewable energy-hybrid power systems," in IET Renewable Power Generation, vol. 13, no. 11, pp. 2000-2012, 19 8 2019.
5. Y. Shi, "AGC Improvement based on Fuzzy PID Control in a Multi-unit Thermal System," 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 786-789.
6. Wind Integration Data Sets, [online] Available: <http://www.nrel.gov/grid/wind-integration-data.html>

E. A. Tsydenov, A. V. Prokhorov

## ADVANCEMENT OF AUTOMATIC GENERATION CONTROL IN POWER SYSTEMS WITH LARGE SHARE OF VARIABLE ENERGY RESOURCES

Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russia

**Abstract:** This paper considers an algorithm for flexible tuning of automatic generation control systems. The proposed approach allows online estimation of plant participation factors in accordance to determined criteria. The algorithm was successfully tested on a model of real 60 GW interconnection containing 464 nodes and 742 branches.

**Key words:** automatic generation control, participation factors, power flow control, power system operation and control

### References

- [1] X. Miao, M. Ilić and Q. Liu, "Enhanced Automatic Generation Control (E-AGC) for Electric Power Systems with Large Intermittent Renewable Energy Sources," 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1-5.
- [2] R. D. Masiello and W. P. Katzenstein, "Adapting AGC to manage high renewable resource penetrations," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6.
- [3] D. Apostolopoulou, A. D. Domínguez-García and P. W. Sauer, "An Assessment of the Impact of Uncertainty on Automatic Generation Control Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 2657-2665, July 2016.
- [4] D. Kler, V. Kumar and K. P. S. Rana, "Optimal integral minus proportional derivative controller design by evolutionary algorithm for thermal-renewable energy-hybrid power systems," in IET Renewable Power Generation, vol. 13, no. 11, pp. 2000-2012, 19 8 2019.
- [5] Y. Shi, "AGC Improvement based on Fuzzy PID Control in a Multi-unit Thermal System," 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 786-789.
- [6] Wind Integration Data Sets, [online] Available: <http://www.nrel.gov/grid/wind-integration-data.htm>

А.В. Шалухо, А.А. Ворошилов, Ю.Н. Шувалова

## ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ «БОЛЬШИХ ДАННЫХ» ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена проблеме выбора типа и оптимальных параметров установок распределенной генерации (РГ) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для повышения эффективности их применения в системах электроснабжения. С развитием цифровых технологий, баз данных и методов обработки информации актуальной становится задача увеличения объема качественных и количественных данных, которые могут быть использованы на этапе проектирования систем с РГ. В статье рассматривается подход к оптимальному выбору типа и установленной мощности источников РГ с применением технологий больших данных (Big Data).

**Ключевые слова:** распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, Big Data.

### Введение

Одно из приоритетных направлений развития электроэнергетики России связано с расширением применения установок распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. РГ предполагает использование местных энергетических ресурсов для производства электроэнергии в непосредственной близости от потребителей, что позволяет повысить энергетическую безопасность (как отдельных объектов, так и регионов), снизить стоимость электроэнергии, минимизировать потери электроэнергии при ее передаче, уменьшить отрицательное влияние на экологию [2].

Эффективность применения источников РГ на основе ВИЭ во многом зависит от выбора оптимального типа и параметров источника, основным из которых является установленная мощность. Задача выбора оптимальных параметров является многокритериальной, поскольку необходимо учитывать совокупность таких факторов, как климатические условия региона установки; удаленность от централизованной электрической сети и т.д.

Работа посвящена проблеме определения оптимальных типов и параметров источников РГ, обеспечивающих высокую эффективность их применения в системах электроснабжения (как централизованных, так и автономных). Объектом исследования являются электротехнические комплексы и системы напряжением 0,4-110 кВ с источниками РГ малой мощности (до 25 МВт). Цель исследования заключается в разработке подхода к выбору оптимальных параметров источников РГ на основе автоматизированного сбора данных с использованием технологий Big Data.



Основными задачами исследования являются анализ технологий Big Data и возможности их применения для выбора оптимальных параметров источников РГ; разработка алгоритма сбора данных о месте размещения источника РГ и технологическом оборудовании; анализ существующих методов оптимизации параметров источников РГ.

### **Перспективы применения технологий Big Data для оптимизации параметров систем с распределенной генерацией**

В настоящее время «большие данные» (*Big Data*) являются одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся направлений информационных технологий. Технология подразумевает хранение и анализ большого объема структурированных данных, сбор, хранение и использование неструктурированных или полуструктурированных данных [5].

Технологии *Big Data* получили распространение во многих отраслях промышленности и бизнеса, где используются для разработки новых программных продуктов, работе с клиентами и т.п. В том числе технологии Big Data находят применение в энергетической отрасли. Так, компания «*Siemens Gamesa*» использует технологии *Big Data* для разработки и эксплуатации интеллектуальных ветряных турбин. Внутри каждой турбины находится более 300 датчиков, которые непрерывно считывают и передают информацию в диагностический центр компании. Благодаря данной разработке компании удастся прогнозировать и предотвращать незапланированные простои, проводить постоянный мониторинг состояния ветротурбин, что позволит обеспечить значительное увеличение жизненного цикла каждой интеллектуальной ветротурбины. Кроме того, управление полученными данными обеспечивает возможность управления способностью ветротурбины улавливать ветер, регулировать шаг и скорость лопастей для поддержания устойчивой работы в суровых климатических условиях [6].

Предполагается, что возможность обрабатывать большое количество исходных данных с помощью технологий *Big Data* позволит повысить эффективность применения источников РГ в системах электроснабжения за счет уточнения выбора их оптимальных параметров на этапе проектирования.

### **Разработка алгоритма автоматизированного сбора данных**

Разработан алгоритм автоматизированного сбора информации, необходимой для решения задачи выбора оптимальных параметров источников РГ (рис. 1).



**Рис. 1. Блок-схема алгоритма сбора данных**

В качестве основных исходных данных предполагается использовать информацию:

- о составе энергетической системы и топологии электрической сети (наличие магистральных и распределительных электрических сетей, наличие магистральных газопроводов и пр.);
- о составе и характеристиках потребителей электроэнергии (установленная мощность, категория электроснабжения, суточные и годовые графики нагрузок и пр.);
- о внешних факторах, влияющих на выбор источников РГ (солнечная инсоляция, периоды солнечной активности, скорости ветра и пр.);
- о предполагаемых к использованию энергоустановках (данные технических паспортов, результаты проведенных испытаний);

Поиск информации предполагается осуществлять одновременно из нескольких источников: базы гидрометцентра (метеорологические станции), базы ПАО Россети, РОСИНФРА, технической документации по энергоустановкам, а также на основе краудсорсинга (делегирования задач широкому кругу лиц).

Полученная с помощью автоматизированного сбора информация будет использована для выбора оптимальных параметров источников РГ.

### **Аналитический обзор методов оптимизации систем с источниками РГ**

Решение задачи выбора оптимальных параметров источников РГ будет основано на методах оптимизации, наиболее подходящих для технологий Big Data. Вопросами оптимизации систем с РГ занимаются многие российские и зарубежные ученые, такие как, Фортов В.Е., Попель О.С., Фрид С.Е. Елистратов В.В. и пр.

Среди наиболее распространенных методов оптимизации систем с РГ можно выделить следующие группы.

1. Расчетные методы, применяющиеся для определения установленной мощности источника РГ, тип которого определяется по основным параметрам места размещения (для ВИЭ, как правило, на основе климатических условий). Данные методы обладают существенными недостатками, поскольку опираются на усредненные и обобщенные данные.

2. Методы однокритериальной оптимизации. В качестве критериев, определяющих вид функции установленной мощности источника РГ, используются энергетические, экономические и экологические критерии. Одним из основных экономических критериев является LCOE, который предполагает сравнение различных вариантов установок путем расчета удельной стоимости электроэнергии.

3. Методы многокритериальной оптимизации. Выбор оптимальной установленной мощности источника РГ осуществляется по двум или более критериям.

4. Методы численной оптимизации. Одним из широко применяемых методов численной оптимизации является метод роя частиц, предназначенный для решения задач непрерывной оптимизации и основанный на моделировании социального поведения колоний. Суть подхода заключается в том, что

оптимальный вариант определяется с помощью системы (роя), состоящей из определенного количества частиц.

5. Эвристические методы оптимизации. Примерами эвристических методов оптимизации, применяемых в системах с РГ, являются генетические алгоритмы. Данные методы представляют процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. Генетический алгоритм моделирует те процессы в популяции, которые являются существенными для развития.

Также для проектирования и оптимизации систем с РГ применяются программные комплексы, среди которых можно выделить следующие.

Программный комплекс *RETScreen*, предназначенный для анализа проектов с использованием чистой энергии на базе электронных таблиц *Excel*, позволяет определить техническую и финансовую целесообразность потенциальных проектов электростанций на ВИЭ и когенерации, а также их энергетическую эффективность [3].

Программный комплекс *Homer*, который предназначен для расчета энергосистем малой мощности и сравнения различных способов производства энергии, моделирует поведение энергосистемы и определяет её стоимость за период эксплуатации, включая стоимость установки и затраты на дальнейшую эксплуатацию. С помощью программного комплекса рассчитываются автономные и соединенные с сетью системы, содержащие различные комбинации источников энергии [4].

Дальнейшие исследования будут направлены на определение наиболее эффективных методов применительно к технологиям *Big Data* для проектирования электротехнических комплексов с источниками РГ.

### Заключение

Проведен анализ технологий *Big Data* и возможности их применения для определения оптимальных параметров источников РГ.

Предложен подход к применению технологий *Big Data* для проектирования электротехнических комплексов с источниками РГ. Разработан алгоритм автоматизированного сбора информации, представляющий собой первый этап реализации подхода.

Проведен анализ существующих методов определения оптимальных параметров источников РГ. В качестве дальнейшего развития работы предполагается разработка алгоритма оптимизации выбора типа и параметров источников РГ на основе анализа полученной информации.

### Библиографический список

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года от 13 февраля 2019 г. № 207-р.
2. **Воропай, Н.И.** Распределенная генерация в электроэнергетических системах, //Малая энергетика: труды Международной научно-практической конференции. 11-14 октября 2005 г., г. Москва, Россия. – Москва, 2005.

3. RETScreen Clean Energy Management Software [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465> (дата обращения 24.04.2021).
4. HOMER Energy [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.homerenergy.com/> (дата обращения 24.04.2021).
5. **Круминь, С. А.**, Использование технологий Big Data в энергетике / С. А. Круминь, А. В. Юрчак // Материалы 12-ой международной молодежной научно-технической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ "РТ - 2016"», 2016.
6. The power of big data [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/digitalization> (дата обращения 24.04.2021).

A. V. Shalukho, A.A. Voroshilov, Y.N. Shuvalova

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL INSTALLED POWER OF DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

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

**Abstract:** The article is devoted to the problem of choosing the type and optimal parameters of distributed generation (DG) installations based on renewable energy sources (RES) to improve the efficiency of their use in power supply systems. With the development of digital technologies, databases and information processing methods, the task of increasing the volume of qualitative and quantitative data that can be used at the design stage of systems with WG becomes urgent. The article discusses an approach to the optimal choice of the type and installed capacity of RG sources using Big Data technologies.

**Keywords:** distributed generation, renewable energy sources, Big Data

### References

- [1] Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 no. 207-r. from Feb. 13, 2019 (in Russian)
- [2] N.I. Voropay Distributed generation in electric power systems, Small-scale power engineering: proceedings of the International scientific-practical conference. October 11-14, 2005, Moscow, Russia. - Moscow, 2005 (in Russian)
- [3] RETScreen Clean Energy Management Software [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465> (Accessed: Apr. 24, 2021).
- [4] HOMER Energy [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com/> (Accessed: Apr. 24, 2021).
- [5] Krumin S. A., Yurchak A. V. Use of Big Data technologies in the energy sector // Materials of the 12th International Youth Scientific and Technical Conference "MODERN PROBLEMS OF RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS" RT - 2016 "", 2016 (in Russian)
- [6] The power of big data [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/digitalization> (Accessed: Apr. 24, 2021).

**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

***СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ***

Редактор **О.В. Пугина**  
Компьютерный набор и вёрстка **В.Г. Петухова**

Подписано в печать 20.10.2021. Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 28,25.  
Тираж 100 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ.  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.