

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**№ 1**

**Нижний Новгород 2020**

**УДК 621.3**  
**ББК 31.2**

**Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. № 1 (9). – 113 с.**

*Выходит 4 раза в год*

**Главный редактор А.Б. Лоскутов**

**зам. гл. редактора**

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

**отв. секретарь**

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

**гл. редактор выпуска**

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

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

**Учредитель:**

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

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

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

**ISSN 2658-6754**

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ХРОНИКИ</b> .....	4
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ</b> .....	5
<b>Вагин Г.Я., Севостьянов А.А.</b> Интеллектуальные электрические сети: требования к электромагнитной совместимости технических средств .....	5
<b>Кузнецов А.В., Ребровская Д.А.</b> Модель оценки эффективности установки компенсирующих устройств в сети потребителя электроэнергии .....	15
<b>Асабин А.А., Белянин И.В., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В.</b> Система управления тиристорного регулятора напряжения .....	25
<b>Прасол Д.А., Щекин В.А.</b> Особенности режимов работы электрической системы 110 кВ Юго-западного энергорайона Белгородской области .....	40
<b>Калинин Е.В.</b> Моделирование потерь в шихтованных сердечниках силовых трансформаторов .....	52
<b>Петров М.И.</b> Регулирование коэффициента трансформации трансформатора регулятора переменного напряжения с синусоидальной вольтодобавкой .....	69
<b>Федоров Г.В., Плехов А.С.</b> Применение модельно-ориентированного подхода при проектировании цифровых систем управления электротехническими объектами .....	78
<b>СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА</b> .....	85
<b>Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Уфа Р.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Киевец А.В.</b> Разработка физической модели статического преобразователя напряжения ВЭУ 4 типа в рамках гибридного подхода .....	85
<b>Стрелков В.Ф., Дарьенков А.Б., Ваняев В.В.</b> Квазирезонансный преобразователь с улучшенными характеристиками .....	98
<b>Наши авторы</b> .....	108

---

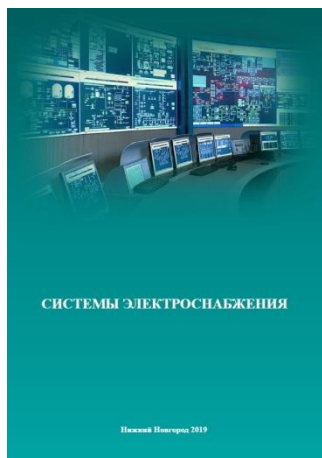
---

## ХРОНИКИ

---

### КАФЕДРЕ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» НГТУ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА – 55 ЛЕТ

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева выпущен учебник по курсу «Системы электроснабжения» (авторы – Г.Я. Вагин, А.Л. Куликов, А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина).



В учебнике рассмотрены вопросы электроснабжения городов и промышленных предприятий при их проектировании, эксплуатации и техническом перевооружении. Подробно изложены: расчет электрических нагрузок, выбор электрооборудования, схемы распределительных сетей и подстанций, вопросы качества электроэнергии. Большое внимание уделено перспективным направлениям развития систем электроснабжения городов и предприятий в рамках «умных сетей» по технологии Smart Grid.

Учебник предназначен для студентов по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям подготовки «Электроснабжение» и «Электроэнергетические системы и сети» всех форм обучения, а также для специалистов в области электроснабжения городов и промышленных предприятий.

Более подробную информацию можно получить по электронной почте: [sosnina@nntu.ru](mailto:sosnina@nntu.ru).

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.311

Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ: ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируются требования к электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств при переходе электроэнергетики России на технологию *Smart Grid* (интеллектуальные сети).

Приведены основные понятия ЭМС, выполнен анализ нормативных документов, описаны электромагнитные помехи (ЭМП) и их влияние на различные технологические средства. Даны рекомендации по применению методов и средств снижения ЭМП.

**Ключевые слова:** интеллектуальные электрические сети, система электро-снабжения, электромагнитные помехи, электромагнитная совместимость.

#### 1. Введение

Техническое средство (ТС) – любое электротехническое, электронное и радиоэлектронное изделие, а также любое изделие, содержащее электрические и (или) электронные составные части, которое может быть отнесено к категориям: компонент, аппарат и установка [1].

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – способность ТС функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать не допустимых электромагнитных помех другим техническим средствам [1].

Электромагнитная обстановка (ЭМО) – совокупность электромагнитных явлений и процессов в заданной области пространства [1].

Электромагнитная помеха (ЭМП) – электромагнитное явление или процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования ТС [1].

Несоблюдение требований ЭМС в системах электроснабжения (СЭС) может быть связано со значительным ущербом, который в России составляет 25 млрд \$ в год [2].

При переводе электрических сетей на технологию *Smart Grid* ущерб от несоблюдения ЭМС будет увеличиваться, поскольку цифровые системы управления и защиты весьма чувствительны к отдельным видам ЭМП. Это связано с отсутствием: нормативно-правовых актов ответственности за нарушение ЭМС; постоянного контроля и мониторинга ЭМС; данных о помехоустойчивости выпускаемых ТС; серийного выпуска приборов анализа ЭМС. Имеет значение и недостаточное количество выпускаемых средств снижения ЭМП.

Проблема ЭМС должна решаться в следующих направлениях:

- разработка нормативно-правовых актов по ЭМС;
- определение ЭМП, создаваемых различными ЭП и ТС;
- определение восприимчивости ЭП и ТС к уровням ЭМП;
- расчет и прогнозирование ЭМП и ЭМС;
- применение методов и средств снижения ЭМП;
- разработка методов и средств кибербезопасности.

## II. Обзор нормативно-правовых актов по ЭМС

Основным нормативным документом по ЭМС в России является технический регламент (ТР) «Электромагнитная совместимость технических средств» [1], принятый в 2011 г. Он содержит перечень стандартов (242 единицы), в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение данного ТР, и перечень стандартов (275 единиц), содержащих правила приема и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе – правила отбора образцов, необходимых для применения и исполнения требований ТР и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции. Данный ТР распространяется на выпускаемые в обращение ТС, способные создавать ЭМП, и (или) качество функционирования которых зависит от воздействия внешних ЭМП.

Техническое средство, выпускаемое в обращение на территории РФ (компоненты, аппараты, стационарные подвижные системы и установки), может быть размещено на рынке и введено в эксплуатацию только в том случае, если подтверждено соответствие минимально необходимым (существенным) требованиям ТР, которые устанавливаются в ТР в отношении следующих ЭМП.

### 1. Низкочастотные кондуктивные:

- установившиеся отклонения напряжения электропитания;
- искажения синусоидальности напряжения электропитания;
- несимметрия напряжений в трехфазных СЭС;
- колебания напряжения электропитания;

- провалы, прерывания и выбросы напряжения электропитания;
- отклонения частоты в СЭС;
- напряжения сигналов, передаваемых в СЭС;
- постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока;
- наведенные низкочастотные напряжения.

2. *Низкочастотные излучаемые ЭМП:*

- магнитные поля;
- электрические поля.

3. *Высокочастотные кондуктивные ЭМП, включая промышленные радиопомехи:*

- напряжения или токи, представляющие собой непрерывные колебания;
- напряжения или токи, представляющие собой переходные процессы (апериодические и колебательные).

4. *Высокочастотные излучаемые ЭМП, включая промышленные радиопомехи:*

- магнитные поля;
- электрические поля;
- электромагнитные поля, в том числе, вызываемые непрерывными колебаниями и переходными процессами.

5. *Электростатические разряды.*

К сожалению, принятый ТР не имеет правового статуса, соответственно, не определены органы государственного контроля (надзора), ответственные за соблюдение его требований и не разработаны штрафные санкции за их нарушение. Все это сдерживает решение проблемы ЭМС ТС в России и требует доработки данного ТР в связи с расширением ЕАЭС.

В Евросоюзе (ЕС) с 01.01.1996 вступила в силу Директива ЭМС 89/336/ЕС [3], утвержденная Советом Министров ЕС. Ее цель – защитить функционирование всего выпускаемого на рынок оборудования и ТС, которое является восприимчивым к ЭМП, от их воздействия. За нарушение Директивы ЭМС предусмотрены штрафные санкции и запрет на выпуск данного оборудования и ТС. С 1996 г. в ЕС не допускается продажа оборудования и ТС без сертификации их соответствия по ЭМС.

### **III. ЭМП создаваемые различными ЭП и ТС**

Для построения СЭС с учетом ЭМС необходимо знать характер и величину ЭМП, создаваемую ЭП и ТС входящими в эту СЭС. В [4-6] приводятся результаты исследований ЭМП создаваемых ЭП и ТС. Основное внимание в них уделяется кондуктивным ЭМП, т.е., помехам, которые распространяются в проводящих средах (провода, кабели, системы заземления и т.д.) Наличие в интеллектуальных сетях большого количества электронных и цифровых элементов, которые чувствительны не только к

кондуктивным ЭМП, но и к ЭМП излучения, распространяющимся в пространстве, требует детального изучения их влияния на цифровые системы интеллектуальных сетей. Результатом исследования должны стать требования к нормированию влияния данных помех, которые впоследствии необходимо внести в стандарт ТР.

Восприимчивость ЭП и ТС к уровням ЭПМ характеризуется как помехоустойчивость – способность ТС и ЭП сохранять заданное качество функционирования при воздействии на них внешних ЭМП с регламентированными значениями параметров [1]. Значение помехоустойчивости ЭП и ТС является необходимым условием построения СЭС с учетом ЭМС. Помехоустойчивость ЭП и ТС закладывается в процессе их изготовления: чем она выше, тем дороже ЭП и ТС. В [7] показано, что в наших стандартах заложены более жесткие требования к помехоустойчивости ЭП и ТС, чем в странах ЕС, причем обеспокоенностей этого ужесточения нигде не опубликовано. Соответственно, наша электротехническая продукция дороже Европейской, что затрудняет ее экспорт.

При установлении норм на помехоустойчивость необходимо учитывать ущербы, которые возникают при воздействии на ЭП и ТС различных видов ЭМП. В [8, 9] приведены значения данных ущербов в долях от общего ежегодного ущерба:

- 1) провалы напряжения и кратковременные прерывания электроснабжения – 57,7 %;
- 2) перенапряжения и переходные процессы – 34,4 %;
- 3) длительные перерывы электроснабжения – 4,3 %;
- 4) фликер, несимметрия, проблемы заземления – 2,7 %;
- 5) высшие гармоники – 0,9 %.

Как видно, преобладающий ущерб наблюдается от первых двух групп ЭМП. Но допустимых норм ЭМП для этих групп в новом стандарте ГОСТ 32144-2014 [10] даже не дается, а основное внимание уделено ЭМП 3-5 групп.

В [11] приведены разработанные в США кривые допустимых амплитуд провалов, кратковременных перерывов, перенапряжений и переходных процессов в зависимости от их продолжительности (кривые СВЕМА, *ITIG* и *SEMI F47*), которым должны соответствовать выпускаемые в США вычислительная и информационная техника. Данные кривые можно использовать и в РФ.

В [12] изложены современные требования и эффективные инженерные методы обеспечения ЭМС при проектировании и монтаже электротехнических и электронных систем и установок с учетом требований Европейской директивы по ЭМС. В России при производстве таких систем необходимо в технической документации приводить сведения о ЭПМ, ко-



торые они генерируют, а также сведения об их чувствительности к различным видам ЭМП.

#### IV. Расчет и прогнозирование ЭМП и ЭМС

Методы расчета некоторых видов ЭМП и ЭМС изложены в работах [4-6], в основном это касается расчета отклонений, колебаний, несинусоидальности и несимметрии напряжений. Учитывая случайный характер ЭМП и ЭМС, для их расчета и прогнозирования весьма перспективно имитационное моделирование СЭС в программных продуктах *PSCAD* и *MatLab Simulink*. Данные продукты позволяют исследовать влияние любых видов ЭМП на ЭП и ТС не только в нормальных режимах их работы, но и при переходных процессах и коротких замыканиях. В связи с этим, необходимо подготовить рекомендации, определяющие методы расчета и прогнозирования ЭМП и ЭМС с учетом современных средств имитационного моделирования сети.

В СЭС обеспечить ЭМС можно схемными путями и применением специальных устройств.

Схемные пути обеспечения ЭМС являются наиболее простыми и экономичными. Можно рекомендовать следующие схемные решения [5, 10]:

- 1) разделение питания ЭП и ТС создающих ЭМП и чувствительных к ЭМП;
- 2) увеличение мощности источников питания СЭС;
- 3) применение блокировок для ограничения одновременной работы крупных ЭП создающих ЭМП;
- 4) равномерное распределение однофазных ЭП по парам фаз;
- 5) применение многопульсных систем выпрямителей;
- 6) применение активных выпрямителей с широтно-импульсной модуляцией.

В соответствии с ГОСТ 32144 [10], ЭМС должна обеспечиваться в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей (точки общего присоединения – ТОП). Для промышленных СЭС, которые характеризуются большим количеством ЭП, создающих различные ЭМП и ЭП чувствительных к ЭМП, ЭМС должна обеспечиваться не только в ТОП, но и в точках внутреннего присоединения (ТВП) ЭП к питающим распределительным пунктам (РП) в соответствии со стандартами МЭК 61000-2-4 и ГОСТ Р 21317.5.4 [13]. В данных стандартах для каждой ТВП установлены три класса ЭМО, в зависимости от видов ЭП и ТС, присоединенных к данной ТВП.

Класс 1 применяется для ЭМО в защищенных СЭС. Он соответствует присоединению в данной ТВП ЭП и ТС очень восприимчивых в ЭПМ, например, контрольно-измерительного лабораторного оборудова-

ния, средств управления технологическими процессами и защиты, вычислительных центров и т.д.

Класс 2 применяется для ЭМО в ТОП и ТВП для промышленных условий эксплуатации ЭП и ТС. Уровни ЭМС данного класса идентичны уровням ЭМС для СЭС общего назначения [10]. Данный класс соответствует присоединению к ТВП ЭП и ТС, не оказывающих большого влияния на ЭМС и не очень чувствительных к ЭМП. Это насосы, вентиляторы, компрессоры, дымососы, станки, электрические печи сопротивления и т.д.

Класс 3 применяется только для ТВП в промышленных условиях эксплуатации. ЭМО может быть отнесена к классу 3, если: питание большей части ЭП и ТС осуществляется от преобразователей тока или частоты; имеют место электросварочная нагрузка, частые пуски электродвигателей; резкие изменения нагрузки.

Ряд ЭП влияют на ЭМС больше, чем ЭП третьего класса (дуговые печи, прокатные станы, крупные электролизные установки). Питание этих ЭП следует отделить от остальных, а нормы ЭМС согласовывать с электроснабжающими организациями. Питание ЭП первого класса также надо отделить от ЭП других классов, а при совместном питании применять защиты от ЭМП. Это системы бесперебойного питания, фильтры или устройства подавления сетевых помех. Разделение ЭП и ТС на классы позволяет значительно упростить построение СЭС с учетом ЭМС. Рекомендуемые схемы питания ЭП различных классов приведены в [5]. Если не удастся схемными путями обеспечить в СЭС ЭМС, необходимо применять специальные средства. Применительно к СЭС городов и промышленных предприятий к таким средствам относятся [5, 6, 14, 15]:

- 1) применение трансформаторов с автоматическим регулированием напряжения;
- 2) применение источников бесперебойного питания;
- 3) применение продольной компенсации;
- 4) применение пассивных фильтров;
- 5) применение активных фильтров;
- 6) применение гибридных фильтров;
- 7) применение корректоров коэффициента мощности;
- 8) применение статических тиристорных компенсаторов;
- 9) применение СТАТКОМов;
- 10) применение трансформаторно-тиристорных регуляторов напряжения и мощности (ТТРНМ);
- 11) применение динамических компенсаторов;
- 12) применение устройств плавного пуска электродвигателей;
- 13) использование систем резервного электроснабжения от мотор-генераторов.

## В. Выводы

Существующая нормативная документация по техническому регулированию является не совершенной. Требования ТР не позволяют полностью обеспечить ЭМС при переходе на технологию *Smart Grid*, что требует внесения дополнений в регламент.

Корректировка ТР должна производиться с учетом: требований нормирования параметров ЭМП, распространяющихся в пространстве; восприимчивости ЭП и ТС к уровням ЭМП в части снижения нормативных значений; применения методов и средств для обеспечения ЭМС в части ЭП, особенно сильно оказывающих влияние на ЭМС; расчета и прогнозирования ЭМП и ЭМС в части выбора методики расчета.

Предложенные новые требования обеспечат повышение качества технического регулирования. Дефицит правовой документации, регулирующей взаимоотношения между субъектами рынка электроэнергетики и определяющей обязательства и степень ответственности за неисполнение обязательств, не позволит решить проблему ЭМС даже при совершенной нормативной документации в отношении технического регулирования. Одним из необходимых правовых требований является обязанность производителей ТС приводить данные о помехоустойчивости в технической документации на продукцию. Необходимость разработки и внедрения правовой базы очевидна.

© Вагин Г.Я., 2020

© Севостьянов А.А., 2020

## Библиографический список

- [1] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011. Электромагнитная совместимость технических средств. Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9.12.2011 г. №879. – 29 с. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.eurasiancommission.org/ky/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TehReg%20TS%20EMS.pdf>
- [2] Доборусин Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С.30-35.
- [3] Commission communication in the framework of the implementation of the Council Directive 89/336/EEC — December 1998 // Official Journal of the European Communities. 1999. № 42 (C 57). С. 2-18.
- [4] Борисов Б.П., Вагин Г.Я. Электроснабжение электротехнологических установок. Киев: Наукова думка, 1985. – 148 с.
- [5] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Н. Новгород, НГТУ, 2004. – 214 с.

- [6] Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойбергер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012 – 351 с.
- [7] Вагин Г.Я., Севостьянов А.А. О необходимости приведения норм ГОСТ 13109-97 к требованиям международных стандартов // Промышленная энергетика. 2004. № 9. С. 45-49.
- [8] Менсон Дж. Решение проблем качества электроэнергии дешевле, чем терпеть от нее убытки // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 49-52.
- [9] Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54-59.
- [10] ГОСТ 32144 – 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [11] Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. М.: Додэка – XXI, 2008. – 336 с.
- [12] Ульямс Т., Амстронг К. ЭМС для систем и установок. М.: ИД Технологии, 2004. – 508 с.
- [13] ГОСТ Р 51317.2.4 – 2000 (МЭК 61000-2-4-94). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. Введ. 2002-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 16 с.
- [14] Чивенков А.И. Развитие методов и средств регулирования напряжения и мощности в системах электроснабжения с автономными источниками энергии: автореф. дис. докт. техн. наук, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2015. – 41 с.
- [15] Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. О трансформаторно-тиристорном регуляторе напряжения и мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 4. С.24-26.

**G.Ya. Vagin, A.A. Sevostyanov**

## **SMART GRID: REQUIREMENTS FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TECHNICAL EQUIPMENT**

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

**Abstract.** The article analyzes the requirements for electromagnetic compatibility (EMC) of technical means during the transition of the Russian electric power industry to Smart Grid technology.

The basic concepts of EMC are presented, an analysis of regulatory documents is performed, electromagnetic interference (EMF) and their influence on various technological means are described. Recommendations are given on the application of methods and means of reducing EMF.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, power supply systems, smart grid.

### **References**

- [1] Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 020/2011. Elektromagnitnaya sovместimost' tekhnicheskikh sredstv [Technical regulations of the Customs Union TP TC 020/2011. Electromagnetic compatibility of technical means]. Approved by decision of the Customs Union Commission No. 879 of Dec. 9, 2011 [Online]. Available at: <http://www.eurasiancommission.org/hy/act/txnreg/deptexreg/tr/Documents/TehReg%20TS%20EMS.pdf>.
- [2] L.A. Doborusin, "Problemy kachestva elektroenergii i elektrosnabzheniya v Rossii [Problems of the quality of electricity and electricity supply in Russia]", *Energoekspert [Energyexpert]*, no. 4 (9), pp. 30-35, 2008 (in Russian).
- [3] "Commission communication in the framework of the implementation of the Council Directive 89/336/EEC — December 1998", *Official Journal of the European Communities*, vol. 42 (C 57), pp. 2-18, Feb. 27, 1999.
- [4] B.P. Borisov and G.Ya. Vagin, *Elektrosnabzhenie elektrotekhnologicheskikh ustanovok [Power supply of electrotechnological installations]*. Kiev: Naukova Dumka, 1985 (in Russian).
- [5] G.Ya. Vagin, A.B. Loskutov and A.A. Sevostyanov, *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in the electric power industry]*. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2004 (in Russian).
- [6] I.V. Zhezhelchenko, A.K. Shidlovsky, G.G. Pivnyak, Yu.L. Saenko and N.A. Neuberger, *Elektromagnitnaya sovместimost' potrebitelej [Consumer Electromagnetic Compatibility]*. Moscow: Mashinostroenie, 2012 (in Russian).
- [7] G.Ya. Vagin and A.A. Sevostyanov, "O neobходимosti privedeniya norm GOST 13109-97 k trebovaniyam mezhdunarodnykh standartov [On the need to bring the

- norms of GOST 13109-97 to the requirements of international standards]”, *Industrial Power Engineering*, no. 9. pp. 45-49, 2004 (in Russian).
- [8] D. Manson, “Reshenie problem kachestva elektroenergii deshevle, chem terpet' ot nee ubytki [Solving power quality problems is cheaper than sustaining losses from it]”, *Energoekspert [Energyexpert]*, no. 4 (9), pp. 49-52, 2008 (in Russian).
- [9] G.Ya. Vagin and A.L. Kulikov, “Electricity quality in power supply systems. Analysis of rationing and control methods”, *Electrical stations*, no. 6 (1055), pp. 54-59, 2019.
- [10] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [11] A. Kusko and M.T. Thompson. Power quality in electrical systems. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [12] T. Williams and K. Armstrong. EMC for Systems and Installations. Oxford: Newnes, 2000.
- [13] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances in industrial plants, GOST R 51317.2.4 – 2000 (IEC 61000-2-4-4), Jan. 2002.
- [14] A.I. Chivenkov, “*Razvitie metodov i sredstv regulirovaniya napryazheniya i moshchnosti v sistemah elektrooborudovaniya s avtonomnymi istochnikami energii [Development of methods and means for regulating voltage and power in power supply systems with autonomous energy sources]*”, *Doc. of Tech. S. thesis*, NNSTU, Nizhny Novgorod, Russia, 2015 (in Russian).
- [15] E.N. Sosnina and R.Sh. Bedretdinov, “About transformer-thyristor voltage and power regulator”, *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont [Electric equipment: operation and repair]*, no. 4, pp. 24-26, 2013

УДК 621.316

А.В. Кузнецов, Д.А. Ребровская

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ульяновский государственный технический университет

Компенсация реактивной мощности в сети потребителя является эффективным способом снижения потерь мощности и электроэнергии. Важным инструментом технико-экономической оценки проекта установки компенсирующих устройств (КУ) является модель годового сбережения. В статье предложена усовершенствованная модель определения годового сбережения при установке КУ, в которой сокращено число входных переменных. Используя математическую, программную или полиномиальную модель, инвестор может получить требуемую информацию для технико-экономического обоснования решения об установке КУ необходимой мощности. Модель позволяет обеспечить инвестору уверенность в возврате затраченных средств на реализацию проекта и принять положительное решение о финансировании проекта и установке КУ.

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, математическая модель, потребитель электроэнергии, сетевая организация, снижение потерь мощности.

### 1. Введение

Компенсация реактивной мощности (КРМ) является одним из эффективных средств снижения потерь мощности и электроэнергии при ее передаче по сетям электроэнергетической системы. При этом снижение потерь обеспечивает как повышение надежности и экономичности электроэнергетической системы, так и снижение расхода органического топлива для выработки электроэнергии [1]. Следовательно, происходит снижение вредных выбросов в атмосферу, улучшение состояния окружающей среды и т.п.

Установка компенсирующих устройств (КУ) снижает потери как в сети потребителя, так и в сетях сетевых компаний: от места установки КУ до генераторов станций. Если КУ устанавливаются в сети потребителя, то и заказчиком инвестиционного проекта выступает потребитель. Он оплачивает все расходы, связанные с реализацией проекта. При этом доход от снижения потерь получает не только потребитель, но и сетевая организация. Установка КУ связана с реализацией инвестиционного проекта, кото-

рый оценивается рядом технико-экономических показателей. Инвестор принимает решение о финансировании проекта на основании анализа этих показателей. Если показатели не устраивают инвестора, решение о финансировании не принимается. В расчет показателей эффективности проекта входит величина годового сбережения, которая определяет их значения. Отсутствие в течение длительного времени точной модели для определения годового сбережения приводит к тому, что инвесторы сомневаются в возврате затраченных средств на реализацию проекта установки КУ в сети потребителя. КУ не устанавливаются, потери в сетях не снижаются.

Годовое сбережение, которое представляет собой стоимость снижения потерь в результате установки КУ, является доходной частью инвестиционного проекта установки КУ. При этом оно представляется суммой стоимости снижения потерь в сети потребителя и стоимости снижения потерь в сетевой организации. Стоимость снижения потерь в сетевой организации представляет собой стоимость услуги по снижению потерь в сетевой организации.

Расчет годового сбережения в собственной сети для потребителя не представляет трудностей. Для этого используется информация о конфигурации сети, нагрузках, режимах работы и т.д. Для расчета годового сбережения в сетевой организации используются модели, позволяющие произвести расчет при ограниченном объеме информации, доступном для потребителя. Долгое время такие модели отсутствовали.

## II. Модели определения годового сбережения при установке КУ

Впервые модели оценки годового сбережения при установке КУ предложены в [2, 3]. Математическая модель [2] представляет собой схему замещения сетевой организации в виде трех сопротивлений, соединенных по схеме «звезда». Одно из сопротивлений является сопротивлением ветви 1, питающей исследуемого потребителя электроэнергии мощностью  $P_1$ , второе сопротивление – это эквивалентное сопротивление ветви 2, питающей эквивалентного потребителя, мощностью  $P_2$  равной сумме мощностей всех потребителей сетевой организации за исключением мощности первого. Третье сопротивление представляет собой эквивалентное сопротивление питающей ветви 3 и соединено с источником питания.

Выражение для определения снижения потерь мощности  $\delta\Delta P_{КУ}^*$  в соответствии с [2] имеет следующий вид:

$$\delta\Delta P_{КУ}^* = 1 - \left[ \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{1, \text{нов}})}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1)} \cdot \frac{\Delta P_1}{\sum_1^3 \Delta P_i} + \frac{\Delta P_2}{\sum_1^3 \Delta P_i} + \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{3, \text{нов}})}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3)} \cdot \frac{\Delta P_3}{\sum_1^3 \Delta P_i} \right], \quad (1)$$



где  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$  – потери в ветвях схемы замещения до КРМ;  
 $\Delta P_{1,нов}, \Delta P_{2,нов}, \Delta P_{3,нов}$  – потери в ветвях схемы замещения после КРМ (новые);

$\text{tg}\varphi_1, \text{tg}\varphi_3$  – коэффициент мощности в ветвях схемы до КРМ;

$\text{tg}\varphi_{1,нов}, \text{tg}\varphi_{3,нов}$  – коэффициент мощности после КРМ.

В [2] приняты следующие обозначения:

$$P_1^* = \frac{P_1}{P_1 + P_2}; Q_{КУ}^* = \frac{Q_{КУ}}{Q_1}, \quad (2)$$

где  $P_1^*$  – относительное значение (в долях) мощности потребителя в первой ветви;  $Q_{КУ}^*$  – степень компенсации реактивной мощности у потребителя в той же ветви за счет установки КУ.

Учитывая принятые обозначения, величины, входящие в выражение (1) вычисляются:

$$\text{tg}\varphi_{1,нов} = (1 - Q_{КУ}^*) \cdot \text{tg}\varphi_1; \quad (3)$$

$$\text{tg}\varphi_3 = P_1^* \cdot \text{tg}\varphi_1 + (1 - P_1^*) \cdot \text{tg}\varphi_2; \quad (4)$$

$$\text{tg}\varphi_{3,нов} = P_1^* \cdot (1 - Q_{КУ}^*) \cdot \text{tg}\varphi_1 + (1 - P_1^*) \cdot \text{tg}\varphi_2; \quad (5)$$

Путем преобразований переменные модели представлены в виде:

$$P_1^*; \frac{\Delta P_1}{P_1}; \frac{\Delta P_2}{P_2}; \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}; \text{tg}\varphi_1; \text{tg}\varphi_2; Q_{КУ}^*. \quad (6)$$

В [4] показано, что со временем смежные потребители могут изменять потребление реактивной мощности путем установки новых КУ, их отключения в результате выхода из строя или демонтажа. При каждом изменении необходим новый расчет, результаты которого будут отличаться от предыдущего. Модель не учитывает динамику изменения состояния КРМ в сетевой организации. В [4] предложено преобразовать параметры схемы замещения с учетом возможной динамики изменения параметров КРМ смежных потребителей.

Преобразование осуществляется к виду, при котором все возможные изменения потоков реактивной мощности от КРМ в сетях смежных потребителей уже произойдут. Такое возможно для момента времени, когда все потребители выполняют условия КРМ, предписанные нормативно-правовыми документами. Этими условиями являются нормированные зна-

чения степени КРМ каждым потребителем. В настоящее время это предельное значение тангенса  $\text{tg}\varphi_{\text{пред}}$  [5].

Создание и совершенствование модели связано с необходимостью активизации потребителей в части КРМ. Для этого, прежде всего, необходимо проинформировать о ее существовании широкий круг научной общественности, потребителей электроэнергии и инвесторов. Целью этого мероприятия является снижение потерь электроэнергии в электроэнергетической системе. Достижению цели способствует совершенствование модели в направлении ее упрощения и создание упрощенных инженерных методик.

### III. Усовершенствованная модель определения годового сбережения при установке КУ

Упрощение модели возможно путем преобразования математической модели в полиномиальную путем применения математической теории планирования эксперимента [6]. Для этого на математической модели проводится серия вычислительных экспериментов при определенном сочетании верхних и нижних пределов варьирования факторов. По результатам вычислительных экспериментов рассчитываются коэффициенты полиномиальной модели и производится ее проверка на адекватность программной модели.

Анализ математической модели позволил сократить число входящих в ее состав переменных с семи до пяти, изменить набор переменных и ввести ограничения на интервалы варьирования факторов, определить константы. В результате анализа математическая модель преобразована к виду:

$$\delta\Delta P_{\text{КУ}}^* = f\left(P_1^*; \frac{\Delta P_1}{P_1}; \frac{\Delta P_2}{P_2}; \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}; \text{tg}\varphi_{1,\text{НАТ}}\right), \quad (7)$$

где  $\text{tg}\varphi_{1,\text{НАТ}}$  - натуральный коэффициент мощности первого потребителя.

Константами модели принимаются следующие величины:

$$\text{tg}\varphi_2 = \text{tg}\varphi_{2,\text{пред}} = 0,4;$$

$$\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = \text{tg}\varphi_{1,\text{пред}} = 0,35; 0,4.$$

Переменная  $\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = \text{tg}\varphi_{1,\text{пред}}$ , значение которой принято константой представляет собой значение коэффициента мощности, к которому необходимо стремиться потребителю при установке КУ. В случае если потребитель получает питание при напряжении ниже 1 кВ ее значение должно быть принято константой равной 0,35. При напряжении 1-35 кВ это значение становится равным 0,4 [5].

В результате анализа области определения факторов получен полный набор переменных с диапазонами изменения, при которых в полиномиальной модели будут исключены случаи использования некорректных значений параметров, выходящих за пределы реально существующих значений. Набор переменных и их диапазон изменения:

$$0,05 \leq P_1^* \leq 1; \quad 0,01 \leq \frac{\Delta P_1}{P_1} \leq 0,05; \quad 0,01 \leq \frac{\Delta P_2}{P_2} \leq 0,05; \quad 0,01 \leq \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2} \leq 0,05; \quad (8)$$

$$0,6 \leq \text{tg}\varphi_{1,\text{НАТ}} \leq 1.$$

Обозначенные переменные будут являться аргументами или воздействующими факторами полиномиальной модели. Для каждого значения константы  $\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = \text{tg}\varphi_{1,\text{пред}}$  проводится полнофакторный вычислительный эксперимент в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1, и составляется уравнение регрессии.

#### IV. Результаты

На основе результатов вычислительного эксперимента по программной модели получены два полиномиальных уравнения регрессии при значениях константы  $\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = \text{tg}\varphi_{1,\text{пред}} = 0,35; 0,4$ .

Вид каждого их уравнений:

$$\delta \Delta P_{\text{КУ}}^* = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (9)$$

где  $a_0, a_i$  – свободный член и коэффициенты уравнения регрессии в именованных единицах  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ;

$a_{ij}$  – коэффициенты парного взаимодействия  $a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{23}, a_{24}, a_{25}, a_{34}, a_{35}, a_{45}$ ;

$n$  – число коэффициентов уравнения регрессии  $n = 5$ ;

$x_i, x_j, x_l$  – значения факторов в кодированных единицах  $i = 1, 2, 3, 4, 5, i + 1 \leq j \leq 5, j + 1 \leq l \leq 5$ .

Свободный член и коэффициенты регрессии определялись следующим образом:

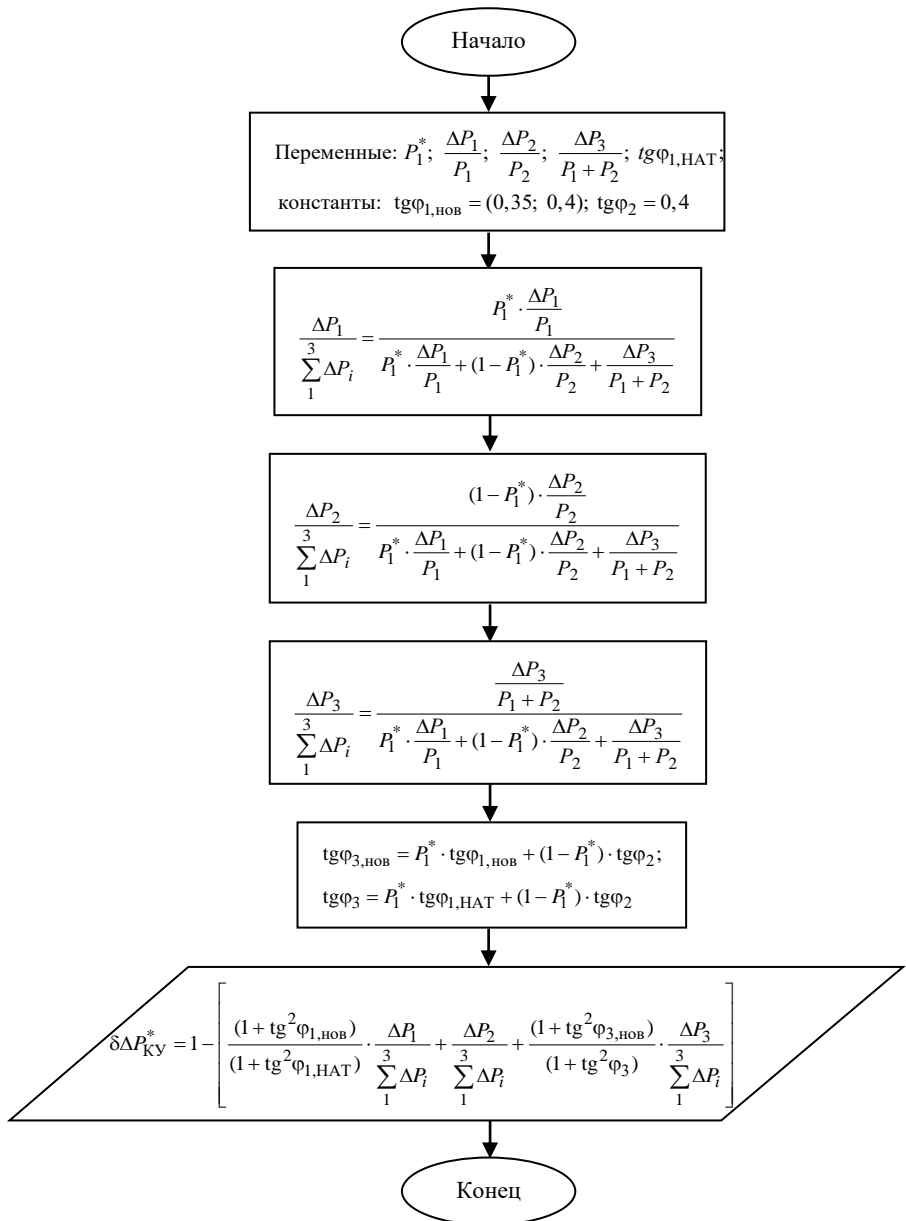


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета  $\delta \Delta P_{KV}^*$  с сокращенным числом переменных

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{KY,k}^* \cdot x_{0,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \Delta P_{KY,k}^*; \quad k = 1, 2, 3 \dots 32; \quad x_{0,k} = 1; \quad (10)$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{KY,k}^* \cdot x_{i,k}; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad k = 1, 2, 3 \dots 32; \quad (11)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{KV,k}^* \cdot x_{i,k} \cdot x_{j,k}; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad i+1 \leq j \leq 5, \quad (12)$$

где  $N$  – число строк матрицы плана ( $N = 32$ ),

$\delta \Delta P_{KY,k}^*$  – значение функции отклика в  $k$ -той строке плана в именованных единицах,

$x_{i,k}, x_{j,k}$  – значение фактора в  $k$ -той строке плана в кодированных единицах.

Уравнения вида (15) могут использоваться для расчета  $\delta \Delta P_{KY}^*$  при значении константы  $\text{tg}\varphi_2 = \text{tg}\varphi_{2,\text{пред}} = 0,4$ . Коэффициенты уравнений регрессии, полученные при вычислительных экспериментах представлены в табл. 1. Установлено, что все коэффициенты уравнений регрессии значимы. А сами уравнения регрессии адекватны математической модели.

Таблица 1.  
Значение коэффициентов модели

Коэффициенты модели	Значения коэффициентов модели	
	$\delta \Delta P_{KY}^* = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$	
	$\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = 0,35$	$\text{tg}\varphi_{1,\text{нов}} = 0,4$
$a_0$	16,234	14,995
$a_1$	14,435	13,358
$a_2$	0,324	0,300
$a_3$	-0,327	-0,298
$a_4$	-0,078	-0,077
$a_5$	6,997	7,225
$a_{12}$	-0,324	-0,300
$a_{13}$	0,327	0,298
$a_{14}$	0,078	0,077
$a_{15}$	6,209	6,422
$a_{23}$	-0,124	-0,115
$a_{24}$	-0,132	-0,122
$a_{25}$	0,139	0,144
$a_{34}$	0,132	0,122
$a_{35}$	-0,143	-0,146
$a_{45}$	-0,031	-0,034

## В. Выводы

Отсутствие в течение длительного времени точной модели для определения годового сбережения при реализации проекта установки КУ в сети потребителя приводит к тому, что инвесторы сомневаются в возврате затраченных средств на реализацию проекта. КУ не устанавливаются, потери в сетях не снижаются.

Предложена усовершенствованная модель оценки годового сбережения от установки КУ. В зависимости от возможностей, потребитель может использовать либо математическую, либо программную, либо полиномиальную модель получения важной информации для технико-экономического обоснования решения об установке КУ необходимой мощности.

Математическая модель позволяет обеспечить инвестору уверенность в возврате затраченных средств на реализацию проекта и принять решение о финансировании проекта.

*Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (договор №18-48-730025/18 от 11.06. 2018 г.).*

© Кузнецов А.В., 2020  
© Ребровская Д.А., 2020

## Библиографический список

- [1] Воротницкий В.Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Энергосовет. 2017. №1 (47). С. 44-53.
- [2] Кузнецов А.В., Аргентова И.В. Математическая модель оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Электротехника. 2016. № 10. С. 68-73.
- [3] Кузнецов А.В., Аргентова И.В., Ребровская Д.А. Программная модель оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Промышленная энергетика. 2016. № 6. С. 48-54.
- [4] Кузнецов А.В., Ребровская Д.А. Уточнение модели оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Промышленная энергетика. 2018. № 10. С. 31-36.
- [5] О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034>.
- [6] Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. М.: Знание, 1982. – 64 с.

**A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya**

## **MODEL FOR ESTIMATING EFFICIENCY OF INSTALLING REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICES IN CONSUMER ELECTRIC NETWORK**

Ulyanovsk State Technical University  
Ulyanovsk, Russia

**Abstract.** Reactive power compensation in the consumer network is an effective way to reduce power and energy losses. An important tool for the feasibility study of the installation of power factor correction devices (PFC) is the annual savings model. The article proposes an improved model for determining annual savings during the installation of PFC, in which the number of input variables is reduced. An investor can obtain the required information for a feasibility study of the decision to install the required capacity of the PFC using a mathematical, software, or polynomial model. The model allows providing the investor with confidence in the return of the funds spent on the project and making a positive decision on the financing of the project and the installation of PFC.

**Keywords:** electricity consumer, grid company, mathematical model, power factor, reactive power compensation, reduction of power losses.

### **References**

- [1] V.E. Vorotnitsky, "Energeticheskaya effektivnost' i kompensaciya reaktivnoj moshchnosti v elektricheskikh setyah. Problemy i puti resheniya [Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Problems and solutions]", *Energosovet [Energy Council]*, vol. 1 (47), pp. 44-53, 2017 (in Russian).
- [2] A.V. Kuznetsov and I.V. Argentova, "Matematicheskaya model' otsenki snizheniya poter' moshchnosti v setevoi organizatsii pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v seti potrebitelya [Mathematical model for estimation of the power losses enhancement in a grid company with power factor compensation in a consumer's network]", *Electrical Engineering*, vol. 10, pp. 68-73, 2016 (in Russian).
- [3] A.V. Kuznetsov, I.V. Argentova and D.A. Rebrovskaya, "Programmnyaya model' otsenki snizheniya poter' moshchnosti v setevoi organizatsii pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v seti potrebitelya [Software model for estimation of the power losses enhancement in a grid company with power factor compensation in a consumer's network]", *Industrial Power Engineering*, vol. 6, pp. 48-54, 2016 (in Russian).
- [4] A.V. Kuznetsov and D.A. Rebrovskaya, "Refinement of the model for estimating the reduction of power losses in the network organization when the reactive power is compensated in the network of the customer", *Industrial Power Engineering*, vol. 10, pp. 31-36, 2018.
- [5] O Poryadke rascheta znachenii sootnosheniya potrebleniya aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti dlya otdel'nykh energoprimayushchikh ustroystv (grupp energoprini-

mayushchikh ustroystv) potrebitelei elektricheskoi energii [About the procedure for calculating the ratio of the consumption of active and reactive power for individual energy receivers (groups of energy receivers) of consumers of electric energy]. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 380 of June 23, 2015. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034> (in Russian).

- [6] Yu.P. Adler, Yu.V. Granovsky, E.V. Markova. *Teoriya eksperimenta: proshloe, nastoyashchee, budushchee (Theory of experiment: past, present, future)*. Moscow: Znaniye, 1982 (in Russian).



УДК 621.31:004.45

А.А. Асабин <sup>1</sup>, И.В. Белянин <sup>2</sup>, Е.Н. Соснина <sup>1</sup>,  
Р.Ш. Бедретдинов <sup>1</sup>, Е.В. Крюков <sup>1</sup>

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского

Объектом исследования является тиристорный регулятор напряжения (ТРН), назначение которого – автоматическое регулирование напряжения и мощности в распределительных электрических сетях (РЭС) среднего напряжения (6-20 кВ). Разработан и исследован первый уровень системы управления ТРН – технологическая система управления. Представлен алгоритм двухзонного поочередного управления тиристорами. Управление тиристорами ТРН осуществляется импульсно-фазовым способом. Программная реализация системы управления ТРН выполнена в среде программирования *LabVIEW*. Для исследования системы управления ТРН разработана испытательная программа. Проведенные исследования показали, что система управления ТРН является полностью работоспособной и выполняет все заданные функции.

**Ключевые слова:** алгоритм двухзонного поочередного управления тиристорами, распределительная электрическая сеть, технологическая система управления, тиристорный регулятор напряжения

### 1. Введение

Интеллектуализация распределительных электрических сетей (РЭС), основанная на широком внедрении технологий Smart Grid, а также стремительное развитие распределенной генерации, характеризуют современное состояние электроэнергетики всех развитых стран мира [1-3]. При этом решается главная задача – повышение качества электроснабжения потребителей, что достигается обеспечением надежности и стабильности функционирования энергосистем в целом [4-6]. Рациональность использования энергоресурсов требует оперативного регулирования напряжения распределительной сети и увеличения эффективности распределения электроэнергии [7-9]. Многие научные исследования направлены на создание устройств, обладающих функциями активно-адаптивного управления параметрами и конфигурацией электрических сетей [10-15].

В НГТУ им. Алексеева разработан экспериментальный образец тиристорного регулятора напряжения (ТРН). Он предназначен для автоматического регулирования напряжения и мощности в РЭС среднего напряжения. На рис. 1 показана схема подключения ТРН к РЭС и структурная схема системы управления ТРН. Принцип действия ТРН основан на совместном использовании продольного (изменение величины) и поперечного (изменение фазы) регулирования напряжения [16].

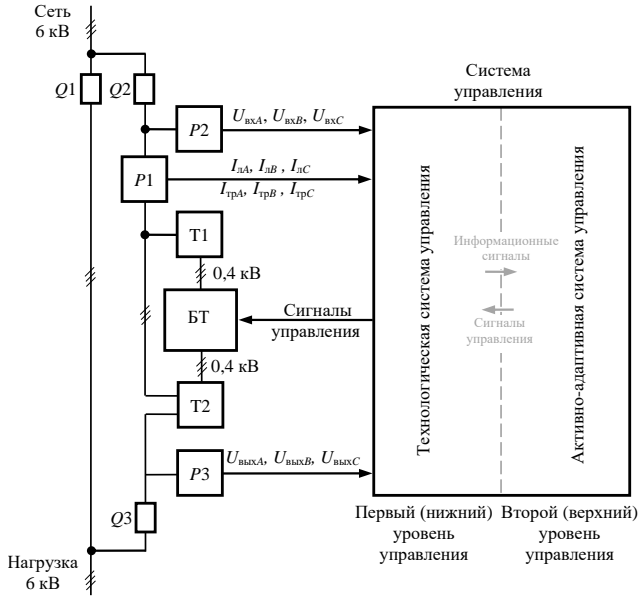


Рис. 1. Схема подключения ТРН к РЭС напряжением 6 кВ:

БТ – блок тиристоров; T1 (T2) – шунтовой (серийный) трансформатор; P1, P2, P3 – блоки датчиков тока, входных и выходных напряжений; Q1-Q3 – высоковольтные выключатели

Основными силовыми элементами ТРН являются: блок тиристоров (БТ), шунтовой T1 и серийный T2 трансформаторы. Блок тиристоров состоит из модулей продольного и поперечного регулирования. Модуль поперечного регулирования вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, сдвинутую на  $\pm 90^\circ$  относительно фазного напряжения источника, что позволяет изменять активную мощность. Модуль продольного регулирования вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, совпадающую или находящуюся в противофазе с фазным напряжением источника. Это позволяет изменять реактивную мощность или стабилизировать напряжение сети.

Система управления ТРН является двухуровневой (рис. 1). Техноло-

гическая система управления (ТСУ) является системой управления первого уровня. Задачей ТСУ является формирование команд управления тиристорами БТ. Активно-адаптивная система управления (ААСУ) – система управления второго уровня. ААСУ выполняет функции мониторинга и дистанционного управления ТРН.

К трансформаторам Т1, Т2 и к линии подключены блоки датчиков напряжения Р2, Р3 и тока Р1. Они подают на входы контроллера системы управления следующие сигналы:

- $U_{вхА}, U_{вхВ}, U_{вхС}$  – напряжения фаз А, В, С трансформатора Т1, равные линейным напряжениям на входе ТРН;
- $U_{выхА}, U_{выхВ}, U_{выхС}$  – линейные напряжения на выходе ТРН;
- $I_{лА}, I_{лВ}, I_{лС}$  – линейные токи фаз А, В, С соответственно;
- $I_{трА}, I_{трВ}, I_{трС}$  – токи в первичных обмотках трансформатора Т1.

По данным сигналам контроллер системы управления вычисляет действующие значения входных и выходных напряжений, линейных токов и токов первичной обмотки шунтового трансформатора. По входным линейным напряжениям контроллер системы управления формирует синхронизирующие сигналы управления для блоков регулирования всех фаз. Причем блок регулирования фазы А является ведущим по отношению к блокам регулирования фаз В и С.

Импульсы управления тиристорами ТРН формируются по алгоритму двухзонного поочередного управления [17]. Применение данного способа позволяет переводить ТРН в непроводящее состояние, тем самым меняя конфигурацию РЭС (в кольцевых сетях), а также оптимизировать напряжение в узлах нагрузки.

Целью работы является исследование функционирования системы управления ТРН 1 уровня и проверка выполнения ее заданных функций.

## II. Описание алгоритма системы управления тиристорами ТРН

На рис. 2 показана принципиальная схема модулей поперечного и продольного регулирования БТ для фазы С. Сдвиг по фазе выходных линейных напряжений относительно входных реализуется модулем поперечного регулирования. Стабилизация величины выходных напряжений осуществляется модулем продольного регулирования.

С целью линеаризации регулировочных свойств ТРН и регулирования напряжения равными ступенями, весь диапазон регулирования напряжения разделен на одинаковые интервалы [18]. Анализ регулировочных характеристик показал, что данный принцип реализуется при дискретном изменении углов управления тиристорами с переменным шагом [19].

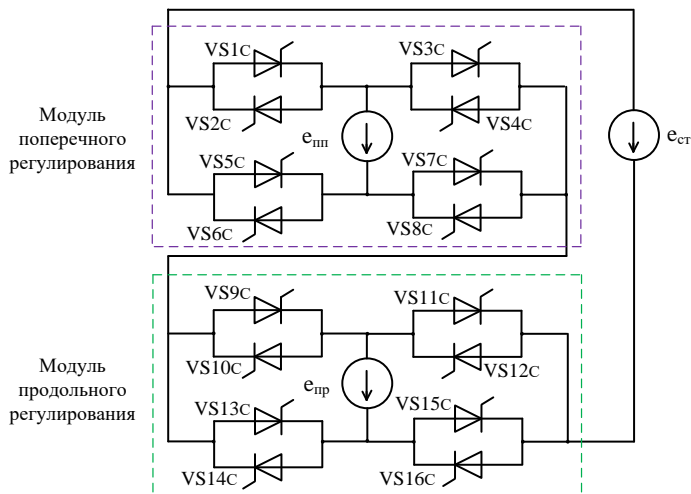


Рис. 2. Принципиальная схема модулей

поперечного и продольного регулирования БТ (фаза С):

VS1-VS16 – регулируемые тиристоры;  $e_{шт}$  и  $e_{пр}$  – ЭДС вторичных обмоток шунтового трансформатора;  $e_{ст}$  – эквивалентная ЭДС, вводимая модулями регулирования

В блоках регулирования всех фаз углы переключения тиристоров принимают следующие значения:  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $180^\circ$ . Эти значения находятся в ячейках постоянных запоминающих устройств, что увеличивает быстродействие регулирования [20]. При этом каждый поддиапазон регулирования напряжения (вольтодобавка или вольтоотбавка), составляющий 10 %, оказывается разделенным на восемь равных интервалов с шагом 1,3 %. Каждому номеру режима соответствует определенная комбинация углов переключения на повышение ( $\alpha_1$ ) и понижение ( $\alpha_2$ ) напряжения. Важно, что при переключении с одного уровня напряжения на другой отсутствует необходимость плавного последовательного прохождения всех промежуточных углов регулирования. При этом регулирование осуществляется дискретно равными ступенями по линейному закону.

### III. Программная реализация алгоритма системы управления ТРН

Программная реализация системы управления выполнена в среде визуального программирования *LabVIEW* с программными модулями *Real Time* и *FPGA*. Исполняемые файлы программы обеспечивают функционирование программируемого контроллера с интегрированной в него программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) *FPGA*, которая

генерирует и передает импульсы управления на тиристоры ТРН. Программа служит для формирования импульсов управления силовых тиристоров ТРН в режимах поперечного и продольного регулирования.

Программа системы управления ТРН представляет сложную иерархическую структуру. На рис. 3 показаны основные блоки программы, которые по модульному принципу объединяются в систему управления. Схема позволяет составить полную картину структуры алгоритма системы управления.

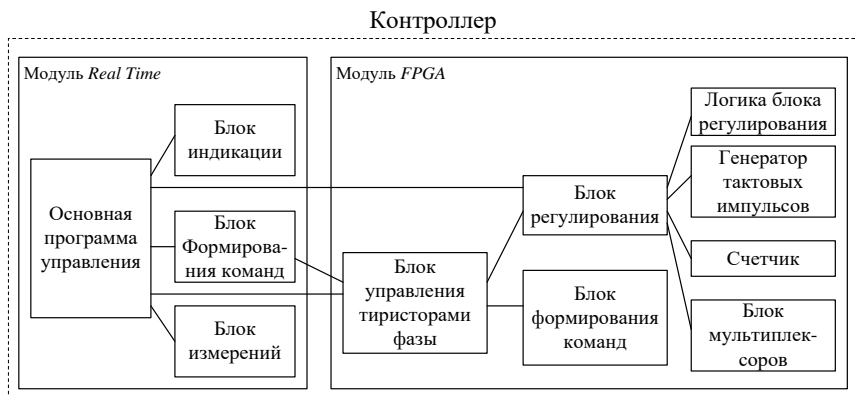


Рис. 3. Иерархия программы управления ТРН

Программа системы управления распределена на нескольких устройствах. Это необходимо для увеличения скорости обработки данных. Контроллер несет на себе нагрузку взаимодействия между фазами, а также прием и передачу информации в любую внешнюю адаптивную систему управления. Модуль *Real Time* обеспечивает измерения частоты, мощности, действующих значений напряжений и токов. Модуль *FPGA* является вторым аппаратным уровнем

В программе используется большое количество элементарных функций, таких как *RS*-триггер, задержка, *D*-триггер, счетчик, мультиплексор и дешифратор. Внешние команды как управляющие воздействия поступают на программируемый контроллер, который их передает в ПЛИС *FPGA*. На уровне *FPGA* формируются синхронизирующие импульсы от полученных значений напряжения высоковольтной обмотки трансформаторов. Эти импульсы генерируются в момент изменения полярности напряжения при его переходе через ноль и дифференцируются на четыре основных синхронизирующих сигнала  $U_0$ ,  $U_+$ ,  $U_-$ ,  $U_{0+}$ . Благодаря командам, полученным от программируемого контроллера, в ПЛИС формиру-

ются импульсы для управления тиристорами ТРН. На уровне *FPGA* из входящего синусоидального сигнала выделяются моменты перехода через ноль, анализируется, когда синус находится в положительном и отрицательном состоянии, а также формируются синхронизирующие импульсы тогда, когда происходит смена знака с минуса на плюс  $U_{0+}$ .

На рис. 4 показана программная реализация блока регулирования. Блок логики регулирования вырабатывает команды управления счетчиками и формирует стробированные сигналы управления этими счетчиками. Основными сигналами управления являются команды «Опережение», «Запаздывание», а также «Выше» и «Ниже». Счетчики фиксируют количество этих команд и формируют выходной результат для дальнейшей обработки, который влияет на формирование импульсов управления групп тиристоров. Формирование импульсов счета стробировано с сигналом  $U_{0+}$  поступающим с датчиков напряжения. Результат счета поступает на блоки дешифраторов, которые формируют конечное число углов управления тиристорами. В результате мы имеем переменные, которые являются определяющими для дешифраторов. Дешифраторы вырабатывают импульсы управления групп тиристоров, стробированные сигналами  $U_+$  и  $U_-$  и генератором, модулирующим заполнение основных управляющих импульсов прямоугольными сигналами с частотой 10 кГц.

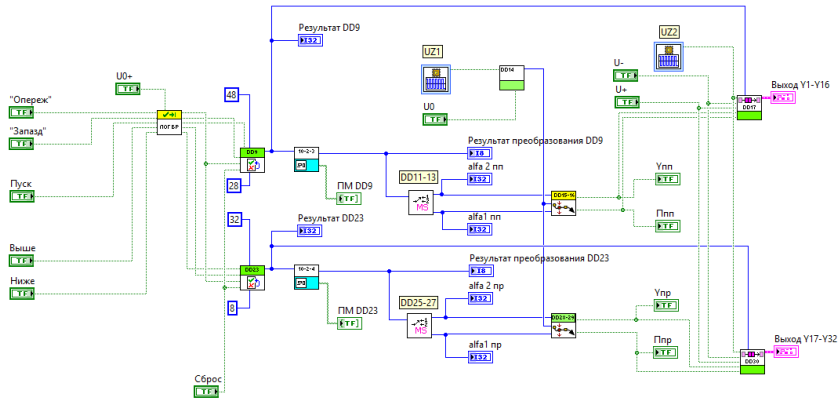


Рис. 4. Программная реализация блока регулирования

Управление ТРН может осуществляться через специализированный интерфейс панели управления промышленного компьютера. Внешний вид панели управления показан на рис. 5. Органы управления организованы в виде блоков кнопок и полей для числового ввода (белый цвет). Вывод информации осуществляется через поля, закрашенные (серый цвет).

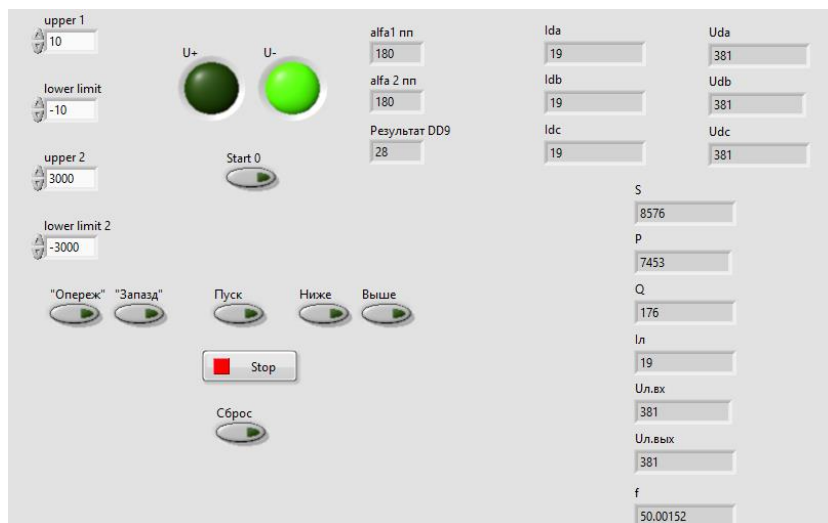


Рис. 5. Внешний вид панели управления

#### IV. Проверка работоспособности ТСУ ТРН

В качестве испытательной базы для исследования выполняемых функций и отладки программы системы управления был использован аппаратный комплекс *NI myRIO*. В момент испытаний обрабатываются прохождения всех управляющих сигналов. Вычисляются и закладываются в постоянное запоминающее устройство настройки для основных и вспомогательных модулей программы. Отлаживаются каждый блок программы на работоспособность и поведение в случае аварийных ситуаций.

После произведенных действий модуль *FPGA* компилируется в машинные коды и используется в этом виде при эксплуатации. В этом случае прямой доступ через отладочный компьютер для него становится недоступен. Среднее время компиляции модуля составляет 20 мин. На рис. 6 показана программная реализация испытательной программы на уровне *FPGA*.

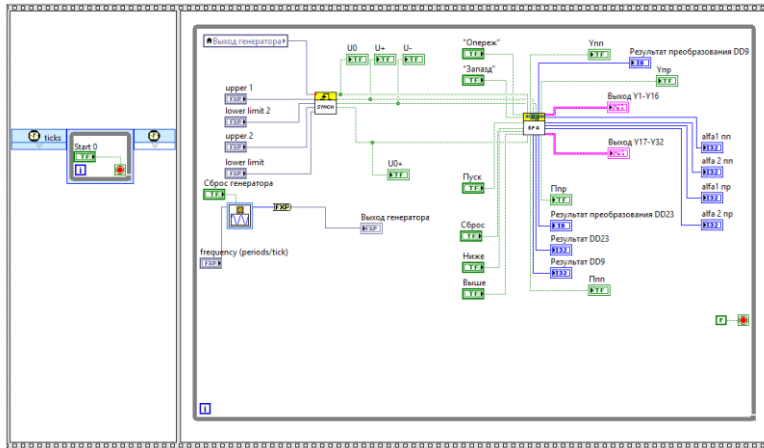


Рис. 6. Программная реализация испытательной программы на уровне *FPGA*

На рис. 7 показана внешняя панель программы испытаний на уровне *FPGA*. На основе двух левых осциллограмм можно получить качественную характеристику входных и выходных сигналов. Отдельные моменты на этапе отладки программы невозможно отследить пошагово при синхронизирующем напряжении частотой 50 Гц. Поэтому специально для выявления сбоев и нарушения синхронизации помимо отладочного режима промышленной частоты 50 Гц, был подключен дополнительный генератор 0,5 Гц. Их сигналы видны на двух правых осциллографах.



Рис. 7. Внешняя панель программы испытаний на уровне *FPGA*



На уровне *FPGA* невозможно оценить временные характеристики импульсов управления тиристорами. Поэтому для получения осциллограмм импульсов была разработана специализированная программа испытаний на уровне контроллера аппаратного модуля *tuRIO*.

В данной программе *Sequence* последовательность состоит из двух кадров. В первом из них производится инициализация и запуск программы *FPGA*; во втором – выводятся все входные и выходные сигналы блока регулирования с датчиком высокого напряжения и выводятся на экран многолучевого осциллографа *Waveform Chart*.

Работоспособность системы управления ТРН заключается в проверке того, что:

- 1) при регулировании напряжения с помощью ТРН работают те тиристоры, которые должны работать при поперечном и продольном режимах;
- 2) возникновение импульсов управления соответствует моменту перехода напряжения через ноль.

## V. Результаты

На рис. 8 показаны осциллограммы цифровых сигналов на тиристорах во время испытаний.

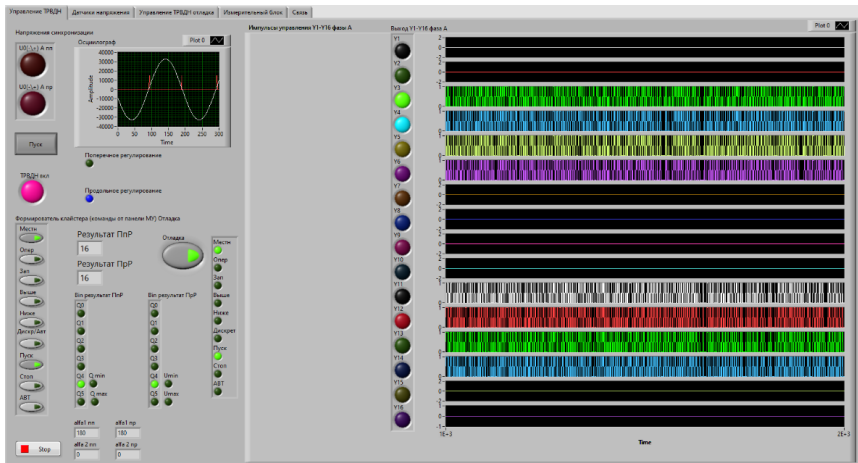


Рис. 8. Панель управления контроллера во время испытаний

В результате проведенных исследований установлено, что в режиме продольного регулирования импульсы управления системой управления подаются на тиристоры:

- в режиме уменьшения напряжения: VS9, VS10, VS15, VS16;

- в режиме увеличения напряжения: VS13, VS14, VS11, VS12;
- базовый режим (нулевое положение): VS13, VS14, VS15, VS16.

В режиме поперечного регулирования импульсы управления системой управления подаются на тиристоры:

- в режиме «запаздывание»: VS1, VS2, VS7, VS8;
- в режиме «опережение»: VS5, VS6, VS7, VS8;
- базовый режим (нулевое положение): VS5, VS6, VS7, VS8.

Импульсы управления подаются только на тиристоры, которые заложены алгоритмом, что указывает на корректность работы системы управления.

На рис. 9 показана осциллограмма формирования импульсов управления.

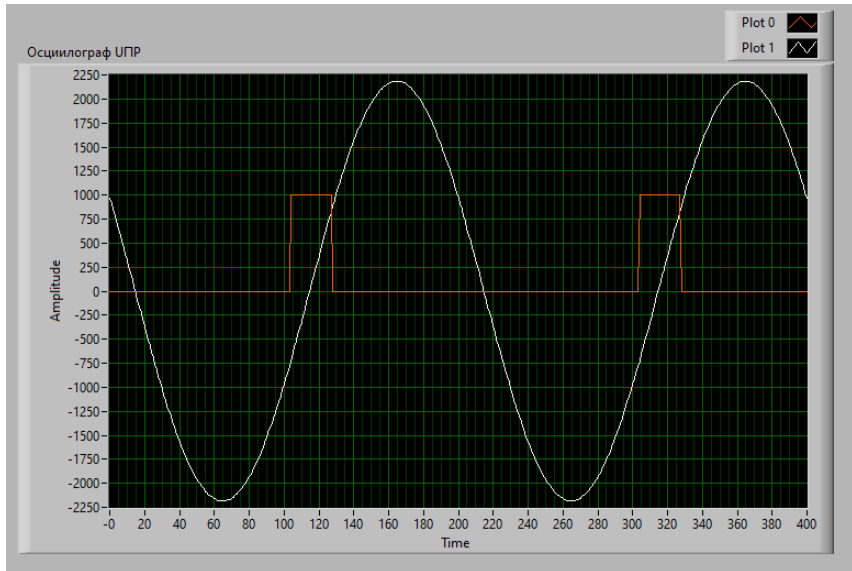


Рис. 9. Синхронизирующие импульсы, сформированные датчиком высокого напряжения, при переходе синусоиды напряжения через ноль с отрицательного значения в положительное

Исследования показали, что синхронизирующий импульс, сформированный датчиком высокого напряжения, появляется в момент перехода синусоиды напряжения через нулевое значение, что также соответствует алгоритму управления.

## VI. Заключение

Исследовано функционирование технологической системы управления ТРН (системы управления 1 уровня) и выполнены заданные функции. Получены и проанализированы диаграммы формирования импульсов управления при поперечном и продольном режимах работы. Согласно разработанному алгоритму двухзонного поочередного управления тиристорами ТРН, переключение осуществляется в момент перехода напряжения через нулевое значение. Это является важным отличием по сравнению с алгоритмами, по которым коммутация осуществляется на интервалах положительного и отрицательного знака мощности. Преимущество нашего алгоритма дает возможность исключить из схемы применение датчика тока, что позволяет избежать некорректной работы системы управления во время режима холостого хода. Благодаря этому, регулировочные свойства ТРН сохраняются при глубоком изменении величины и фазы тока нагрузки.

Приведено описание программной реализации системы управления первого уровня ТРН. С помощью разработанного программно-аппаратного комплекса системы управления ТРН выполнена проверка ее работоспособности. Получена качественная характеристика входных и выходных сигналов. Для отладки программной части системы управления выполнен пошаговый анализ процесса формирования синхронизирующего напряжения. Установлено, что импульсы управления тиристорами формируются в соответствии с принципами разработанного алгоритма. Модуль *FPGA* генерирует и передает импульсы управления на тиристоры ТРН.

Результаты исследований показали, что система управления ТРН обеспечивает плавность и заданную точность регулирования напряжения при поперечном и продольном режимах. Управление ТРН с помощью системы управления является быстродействующим и ведется в режиме реального времени. Установлено, что систем управления ТРН является полностью работоспособной и выполняет все заданные функции. ТРН способен поддерживать уровень напряжения электрической сети во всех рассмотренных режимах. Таким образом, применение ТРН решает задачу качества электроснабжения потребителей и способствует интеллектуализации РЭС.

© Асабин А.А., 2020

©Белянин И.В., 2020

© Соснина Е.Н., 2020

©Бедретдинов Р.Ш., 2020

© Крюков Е.В., 2020

**Библиографический список**

- [1] Antoniadou-Plytaria K.E., Kouveliotis-Lysikatos I.N., Georgilakis P.S., Hatzigiargyriou N.D. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. № 8 (6), P. 2999-3008.
- [2] Ng C.H., Logenthiran T., Woo W.L. Intelligent distributed smart grid network – re-configuration // *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Nov. 3-6, 2015, Bangkok, Thailand. P. 1–6.
- [3] Ardito L., Procaccianti G., Menga G., Morisio M. Smart Grid technologies in Europe: an overview // *Energies*. 2013. № 6 (1). P. 251-281.
- [4] Li H., Lv C., Zhang Y. Research on new characteristics of power quality in distribution network // *IEEE International Conf. on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, July 12-14, 2019, Shenyang, China. P. 6-10.
- [5] Yang F., Wu Y., Shen Y., Zhong P., Wang Y., Yin Z. Power quality evaluation method for multi-power quality problem in distribution network // *IEEE Sustainable Power and Energy Conf.: Grid Modernization for Energy Revolution (iSPEC)*, Nov. 21-23, 2019, Beijing, China. P. 2879-2884.
- [6] Urquizo J., Singh P., Kondrath N., Hidalgo-Leon R., Soriano G. Using D-FACTS in microgrids for power quality improvement: a review // *IEEE 2nd Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Oct. 16-20, 2017, Salinas, Ecuador. P. 1-6.
- [7] Li N., Qu G., Dahleh M., Real-time decentralized voltage control in distribution networks // *52nd Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Sept. 30 – Oct. 3, 2014, Monticello, USA, P. 582-588.
- [8] Wang J., Wang Z., Xu L., Wang Z. A summary of applications of D-FACTS on microgrid // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, March 27-29, 2012, Shanghai, China.
- [9] Ren M., Yang P., Li C., Li Q., Wang Y., Lei Y. Application and research of automatic voltage control system for power grid // *Chinese Automation Congress (CAC)*, Nov. 30 – Dec. 2, 2018, Xi'an, China. P. 19-23.
- [10] Panfilov D.I., Petrov M.I., Rashitov P.A., Astashev M.G., Rozhkov A.N. Development of thyristors voltage regulator operating with different load characteristics // *IEEE International Conf. on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I and CPS Europe)*, June 12-15, 2018, Palermo, Italy.
- [11] Xia D., Wang H., Ma W., Xu H., Gu S., Zhu Y. On-load automatic voltage regulation system with thyristor for distribution transformer // *Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus*. 2017. № 53 (12). P. 168-174.
- [12] De Lima R.R., Guimarães G.C., De Oliveira A., Chaves M.L.R., Silva P.R.C., Benichio V.M. Design and implementation of a new on-load voltage regulator for power distribution systems // *IEEE/PES Power Systems Conf. and Exposition (PSCE)*, March 15-18, 2009, Seattle, USA.
- [13] Sosnina E.N., Chivenkov A.I., Lipuzhin I.A. Solid-State voltage regulator for a 6-10 kV distribution network // *International Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 3-4, 2018, Vladivostok, Russia.

- [14] Sosnina E., Asabin A., Kralin A., Bedretdinov R. Research of voltage and power solid-state regulator in 6-20 kV network // 2nd International Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia.
- [15] Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная Электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-27.
- [16] Асабин А.А., Соснина Е.Н., Кралин А.А., Крюков Е.В. Универсальный тиристорный регулятор величины вольтодобавочного напряжения, Пат. 2710660 РФ, заявл. 27.06.19; опубл. 30.12.19.
- [17] Asabin A.A., Kralin A.A., Kryukov E.V. Thyristor voltage regulator control algorithm research // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 643, is. 1, 2019, Saint Petersburg, Russia.
- [18] Асабин А.А., Соснина Е.Н., Кралин А.А., Бедретдинов Р.Ш. Устройство управления тиристорным регулятором вольтодобавочного напряжения, Пат. 192343 РФ, заявл. 28.06.19; опубл. 13.09.19.
- [19] Асабин А.А., Кралин А.А. Энергетические показатели тиристорного регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным трансформатором при очередном двухзонном управлении // Интеллектуальная Электротехника. 2018. № 2 (2). С. 93-104.
- [20] Асабин А.А., Соснина Е.Н., Кралин А.А., Бедретдинов Р.Ш. Импульсно-фазовое управление тиристорами регулятора величины и фазы добавочного напряжения для распределительной электрической сети 6-20 кВ. Свидетельство ЭВМ 2018666791 РФ, заявл. 23.11.18; опубл. 20.12.18.

**A.A. Asabin<sup>1</sup>, I.V. Belyanin<sup>2</sup> E.N. Sosnina<sup>1</sup>,  
R.Sh. Bedretdinov<sup>1</sup>, E.V. Kryukov<sup>1</sup>**

## **CONTROL SYSTEM OF THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR**

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The creation of Smart Grid is impossible without devices that provide active and adaptive control of parameters and configuration of the electric network. A Thyristor Voltage Regulator (TVR) is such a device. The TVR application is automatic voltage and power regulation in medium voltage power distribution networks (6-20 kV). The article is devoted to the development and research of a first level of the TVR control system - technological control system. The two-zone sequential algorithm for thyristors control has been developed. TVR thyristors are controlled in a pulse-phase method. Shows a diagram of control pulses formation. The software implementation of the TVR control system is performed in the *LabVIEW*. A test program has been developed for

TVR control system research. Research has shown that TVR control system is completely efficient and performs all specified functions.

**Keywords:** two-zone sequential thyristors control algorithm, power distribution network, technological control system, thyristor voltage regulator.

### References

- [1] K.E. Antoniadou-Plytaria, I.N. Kouveliotis-Lysikatos, P.S. Georgilakis and N.D. Hatziargyriou, "Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999-3008, Nov. 2017.
- [2] C.H. Ng, T. Logenthiran and W.L. Woo, "Intelligent distributed smart grid network – reconfiguration", in proc. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Nov. 3-6, 2015, Bangkok, Thailand, pp. 1-6.
- [3] L. Ardito, G. Procaccianti, G. Menga and M. Morisio, "Smart Grid technologies in Europe: an overview," *Energies*, vol. 6, no. 1, pp. 251-281, Jan. 2013.
- [4] H. Li, C. Lv, and Y. Zhang, "Research on new characteristics of power quality in distribution network", in proc. *IEEE International Conf. on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, July 12-14, 2019, Shenyang, China, pp. 6-10.
- [5] F. Yang, Y. Wu, Y. Shen, P. Zhong, Y. Wang and Z. Yin, "Power quality evaluation method for multi-power quality problem in distribution network", in proc. *IEEE Sustainable Power and Energy Conf.: Grid Modernization for Energy Revolution (iSPEC)*, Nov. 21-23, 2019, Beijing, China, pp. 2879-2884.
- [6] J. Urquizo, P. Singh, N. Kondrath, R. Hidalgo-Leon and G. Soriano, "Using D-FACTS in microgrids for power quality improvement: a review", in proc. *IEEE 2nd Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Oct. 16-20, 2017, Salinas, Ecuador, pp. 1-6.
- [7] N. Li, G. Qu and M. Dahleh, "Real-time decentralized voltage control in distribution networks", in proc. *52nd Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Sept. 30 – Oct. 3, 2014, Monticello, USA, pp. 582-588.
- [8] J. Wang, Z. Wang, L. Xu and Z. Wang, "A summary of applications of D-FACTS on microgrid", in proc. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, March 27-29, 2012, Shanghai, China.
- [9] M. Ren, P. Yang, C. Li, Q. Li, Y. Wang and Y. Lei, "Application and research of automatic voltage control system for power grid", in proc. *Chinese Automation Congress (CAC)*, Nov. 30 – Dec. 2, 2018, Xi'an, China, pp. 19–23.
- [10] D.I. Panfilov, M.I. Petrov, P.A. Rashitov, M.G. Astashev and A.N. Rozhkov, "Development of thyristors voltage regulator operating with different load characteristics", in proc. *IEEE International Conf. on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I and CPS Europe)*, June 12-15, 2018, Palermo, Italy.
- [11] D. Xia, H. Wang, W. Ma, H. Xu, S. Gu and Y. Zhu, "On-load automatic voltage regulation system with thyristor for distribution transformer", *Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus*, vol. 53, is. 12, pp. 168-174, Dec. 2017.
- [12] R.R. De Lima, G.C. Guimarães, A. De Oliveira, M.L.R. Chaves, P.R.C. Silva and V.M. Benichio, "Design and implementation of a new onload voltage regulator for

- power distribution systems”, in proc. *IEEE/PES Power Systems Conf. and Exposition (PSCE)*, March 15-18, 2009, Seattle, USA.
- [13] E.N. Sosnina, A.I. Chivenkov and I.A. Lipuzhin, “Solid-State voltage regulator for a 6-10 kV distribution network”, in proc. *International Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 3-4, 2018, Vladivostok, Russia.
- [14] E. Sosnina, A. Asabin, A. Kralin and R. Bedretdinov, “Research of voltage and power solid-state regulator in 6-20 kV network”, in proc. *2nd International Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia.
- [15] A.B. Loskutov, “Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1 (1), pp. 9-27, 2018.
- [16] A.A. Asabin, E.N. Sosnina, A.A. Kralin and E.V. Kryukov, “*Universal'nyj tiristornyj regulyator velichiny vol'todobavochnogo napryazheniya [Universal booster thyristor voltage regulator]*”, R.F. Patent 2710660, Dec. 30, 2019 (in Russian).
- [17] A.A. Asabin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov, “Thyristor voltage regulator control algorithm research”, in proc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 643, is. 1, Saint Petersburg, 2019.
- [18] A.A. Asabin, E.N. Sosnina, A.A. Kralin and R.Sh. Bedretdinov, “*Ustrojstvo upravleniya tiristornym regulyatorom vol'todobavochnogo napryazheniya [Control device of booster thyristor voltage regulator]*”, R.F. Patent 192343, Sept. 13, 2019 (in Russian).
- [19] A.A. Asabin and A.A. Kralin, “Energy indicators of thyristor AC voltage regulator with booster transformer under alternate two-zone control”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2 (2), pp. 93-104, 2018.
- [20] A.A. Asabin, E.N. Sosnina, A.A. Kralin and R.Sh. Bedretdinov, “*Impul'sno-fazovoe upravlenie tiristorami regulyatora velichiny i fazy dobavochnogo napryazheniya dlya raspredelitel'noj elektricheskoy seti 6-20 kV [Pulse-phase control of the boost value and phase voltage thyristor regulator for 6–20 kV power distribution network]*”, R.F. Certificate 2018666791, Dec. 20, 2018 (in Russian).

УДК 621.31

Д.А. Прасол, В.А. Щекин

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 110 кВ ЮГО-ЗАПАДНОГО ЭНЕРГОРАЙОНА БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Рассмотрена электрическая система 110 кВ Юго-Западного энергорайона Белгородской области. Выполнен расчет потоков мощности и уровней напряжения на шинах подстанций в нормальном и аварийном режимах работы с помощью программно-вычислительного комплекса *RastrWin 3*. Выявлены места снижения напряжения ниже уставки автоматики ограничения снижения напряжения. Для предотвращения последствий аварийного режима существуют ограничения по мощности на время плановых отключений, в системе возникает дефицит мощности. Особенности режимов работы и возникновение дефицита мощности являются серьезными проблемами в электрической системе 110 кВ Юго-Западного энергорайона Белгородской области. Предложен вариант решения проблем – строительство новой воздушной линии 110 кВ. Предлагаются два возможных варианта построения воздушной линии.

**Ключевые слова:** аварийный режим, воздушная линия, дефицит мощности, надежность электроснабжения, нормальный режим, подстанция, устойчивость электрической системы.

### 1. Введение

Одной из основных причин снижения устойчивости и надежности существующих электрических систем является рост мощностей потребителей, изменение режимов потребления электроэнергии, моральный и физический износ электрооборудования. При этом в электрических системах могут возникать неустойчивые режимы с отключением потребителей, дефицитом мощности, низким уровнем напряжения на шинах подстанций [1–3]. Важной и актуальной задачей является устранение подобных режимов путем реконструкции или модернизации электрических систем, оптимизация режимов потребления электроэнергии. При этом должны широко внедряться мероприятия по повышению устойчивости электрических систем и надежности электроснабжения потребителей. Целью работы является выявление особенностей режимов работы электрической системы 110 кВ Юго-Западного энергорайона Белгородской области. На основании



параметров режимов может быть произведена оценка устойчивости системы, показателей качества электроэнергии, потерь мощности, а также разработаны варианты реконструкции с целью повышения надежности и энергоэффективности [1–6].

## II. Характеристика электрической системы 110 кВ

Рассматривается Юго-Западный участок энергосистемы Белгородской области – электрическая система 110 кВ, которая содержит воздушные линии (ВЛ) электропередач и подстанции. Рассматриваемая электрическая система 110 кВ характеризуется большой протяженностью воздушных линий электропередач – 386,51 км, и большим количеством соединяемых подстанций (ПС) 110 кВ – 12. Источниками питания системы являются две узловые подстанции 330 кВ: «Белгород-330» и «Фрунзенская». От технического состояния и пропускной способности ВЛ и конфигурации сети рассматриваемой электрической системы зависит надежность и качество передачи электроэнергии на подстанции Юго-Западного энергорайона и питание его потребителей. В нормальном режиме электрическая система получает питание по трем ВЛ 110 кВ от ПС 330 кВ «Фрунзенская» и по двум ВЛ 110 кВ от ПС 330 кВ «Белгород-330». Между подстанциями потребителей 110 кВ осуществляется транзит мощности, поддерживается устойчивый уровень напряжения на шинах подстанций и происходит выдача мощности потребителям. Структурная схема электрической системы представлена на рис. 1.

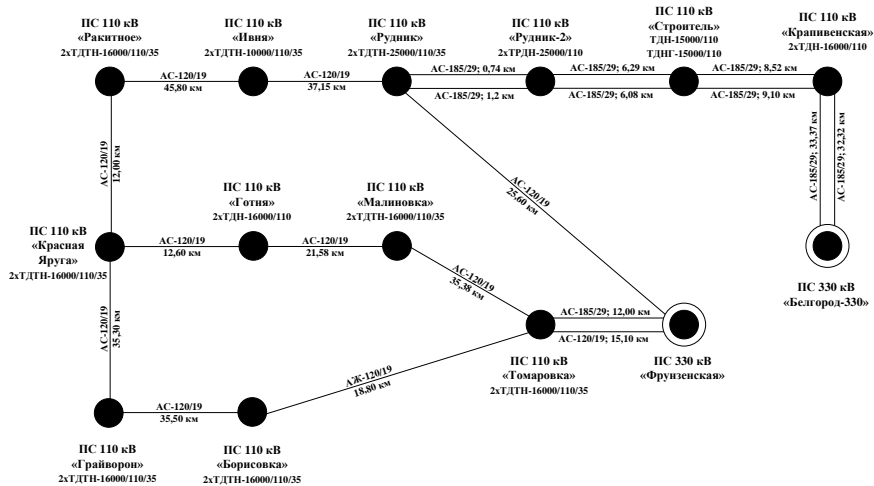


Рис. 1. Структурная схема электрической системы 110 кВ

В табл. 1 представлены исходные данные подстанций, входящих в рассматриваемую электрическую систему. Параметры воздушных линий электрической системы указаны на рис. 1.

Таблица 1.  
Исходные данные подстанций

Название подстанции	$U_{ном},$ кВ	Зима		Лето		Трансформатор	$K_{тр}$
		$P_{и},$ МВт	$Q_{и},$ Мвар	$P_{и},$ МВт	$Q_{и},$ Мвар		
«Белгород-330»	110	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
«Фрунзенская»	110	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
«Крапивенская»	10	6,10	4,10	6,79	4,85	ТДН-16000/110	115/11
«Строитель»	6	6,43	2,23	4,04	2,34	ТДНГ-15000/110	112/6,3
	6	5,04	1,75	5,1	2,27		115/6,6
«Рудник-2»	6	6,12	6,18	5,51	6,6	ТРДН-25000/110	115/6,6
«Рудник»	6	5,12	6,03	3,65	6,36	ТДТН-25000/110	115/6,6
	35	4,42	1,48	4,08	2,399		115/38,5
«Ивня»	10	3,16	1,00	2,2	1,35	ТДТН-10000/110	115/11
	35	3,12	1,38	2,54	1,33		115/38,5
«Ракитное»	10	2,58	1,05	1,97	0,80	ТДТН-16000/110	115/38,5
	35	3,31	1,30	3,38	2,08		115/38,5
«Красная Яруга»	10	4,31	1,77	4,27	2,57	ТДТН-16000/110	115/11
	35	3,90	1,09	2,87	1,49		115/38,5
«Готня»	10	12,05	5,21	8,10	3,09	ТДН-16000/110	115/11
«Малиновка»	10	10,53	5,21	13	7,34	ТДТН-16000/110	115/11
	35	3,28	1,20	2,44	1,45		115/38,5
«Грайворон»	10	6,39	1,45	4,31	1,55	ТДТН-16000/110	115/11
	35	11,77	4,28	9,10	4,31		115/38,5
«Борисовка»	10	6,66	1,83	4,97	1,96	ТДТН-16000/110	115/11
	35	4,50	1,47	2,58	1,07		115/38,5
«Томаровка»	10	8,27	2,01	6,36	3,19	ТДТН-16000/110	115/11
	35	8,56	3,09	6,7	4,11		115/38,5

Для расчета режимов работы электрической системы составлена схема замещения (рис. 2). На ней каждая ВЛ переменного тока напряжением 110 кВ представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами П-образного вида [7]. Трансформаторы представлены Г-образной схемой замещения, все параметры трансформаторов приведены к высшему напряжению [7]. Определены параметры элементов схемы замещения на основе исходных данных.

На основе данной схемы замещения с определенными параметрами выполнен расчет нормального и аварийного режимов работы электрической системы 110 кВ Юго-Западного энергорайона Белгородской области.

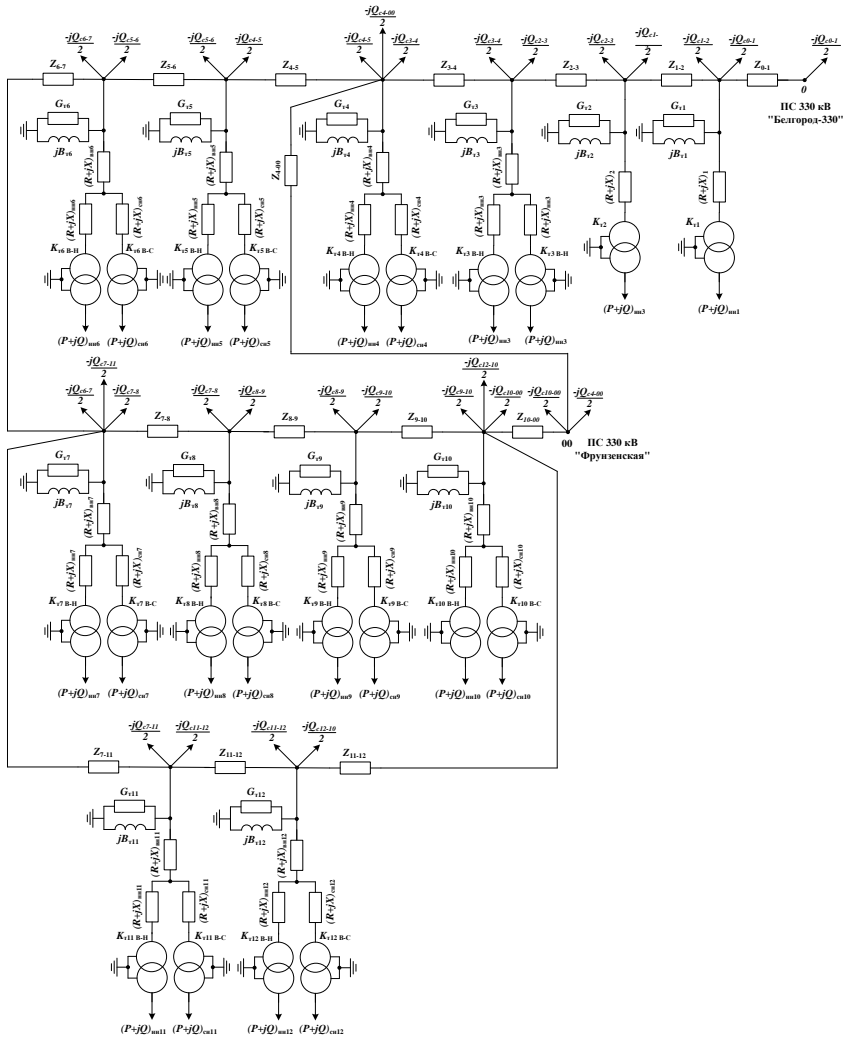


Рис. 2. Схема замещения нормального режима электрической системы

### III. Расчет и анализ нормального режима работы

Конфигурация сети электрической системы является сложной, поэтому расчет режимов в таких случаях обычно производится с применением специализированного программного обеспечения [2, 6, 8-10]. Для рассматриваемой электрической системы расчет режимов выполнен в про-

граммно-вычислительном комплексе (ПВК) *RastrWin 3* [2, 6, 10]. В нормальных условиях все элементы сети находятся в рабочем состоянии, и обеспечивается нормальная работа и устойчивость системы. В табл. 2 представлены выборочные результаты расчета нормального режима в ПВК *RastrWin 3* в зимний и летний периоды, а именно приведены значения напряжений на шинах некоторых подстанций системы при исходной нагрузке с отпайками устройств РПН и ПБВ на номинальных уровнях.

Таблица 2.  
Уровни напряжений на шинах подстанций в нормальном режиме

Подстанция	Уровень напряжения	Лето		Зима	
		$U$ , кВ	$\Delta U$ , кВ	$U$ , кВ	$\Delta U$ , кВ
«Ивня»	ВН	112,40	2,60	112,05	2,95
	СН	36,98	1,52	36,89	1,61
	НН	10,50	0,50	10,53	0,47
«Ракитное»	ВН	109,40	5,60	108,87	6,13
	СН	36,21	2,29	36,10	2,40
	НН	10,31	0,69	10,32	0,68
«Красная Яруга»	ВН	108,96	6,04	108,39	6,61
	СН	35,87	2,63	35,81	2,69
«Готня»	НН	10,17	0,83	10,22	0,78
	ВН	108,89	6,11	108,31	6,69
	НН	10,27	0,73	10,16	0,84
«Малиновка»	ВН	109,49	5,51	109,27	5,73
	СН	35,21	3,29	35,53	2,97
	НН	9,84	1,16	10,04	0,96
«Грайворон»	ВН	109,21	5,79	108,46	6,54
	СН	35,61	2,89	35,29	3,21
	НН	10,13	0,87	10,08	0,92
«Борисовка»	ВН	111,32	3,68	110,82	4,18
	СН	36,81	1,69	36,56	1,94
	НН	10,46	0,54	10,43	0,57
«Томаровка»	ВН	113,27	1,73	113,14	1,86
	СН	36,79	1,71	37,00	1,50
	НН	10,42	0,58	10,55	0,45

Результаты расчетов показали, что в нормальном режиме напряжения на шинах подстанций находятся на требуемом уровне, токовая нагрузка линий не превышает предельно допустимую.

#### IV. Расчет и анализ аварийного режима работы

До 2000-х гг. нагрузки на ПС были незначительными из-за спада производства и общего упадка экономики, что не способствовало возник-

новению аварийных режимов и не приводило к массовым отключениям. Также до 1990-х гг. существовала связь с энергосистемой Украины по ВЛ 110 кВ «Грайворон» – «Казачья Лопань», что обеспечивало питание Юго-Западного узла через ПС «Грайворон». После распада СССР произошло разделение энергосистем России и Украины по сетям 35-110 кВ и переводу линии «Грайворон» – «Казачья Лопань» на охранное напряжение 10 кВ (СН II), что привело к потере дополнительного узла питания и резерва мощности.

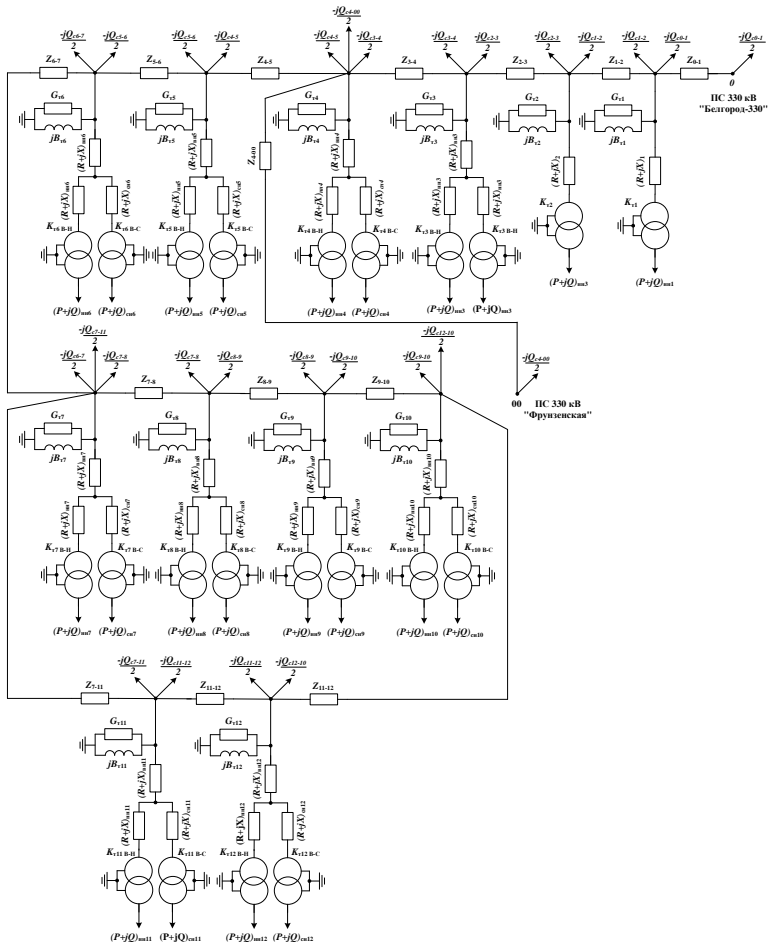


Рис. 3. Схема замещения аварийного режима электрической системы

В 2000-х гг. с началом развития экономики произошел рост нагрузок на ПС Юго-Западного участка и возник дефицит мощности. Для решения этой проблемы была проложена линия от вновь построенной ПС 330 кВ «Фрунзенская» на ПС 110 кВ «Томаровка», а также переведено питание старой линии с ПС 330 кВ «Белгород-330» на ПС «Фрунзенская». Данное мероприятие на время решило проблему дефицита мощности и недопустимого падения напряжения в узлах.

Дальнейшее развитие экономики региона и строительство больших агрокомплексов привело к резкому увеличению нагрузки. Снова возникла проблема лавинного падения напряжения и отключения всего Юго-Западного участка сети 110 кВ при плановом обслуживании одной из линий 110 кВ «Фрунзенская» – «Томаровка» и аварийному отключению второй линии. Для предотвращения отключения всего участка на подстанциях «Красная Яруга», «Готня», «Малиновка», «Томаровка», «Грайворон», «Борисовка» была установлена автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН) с уставкой 86 кВ, которая предотвращает «лавины напряжения» и обеспечивает устойчивость системы 110 кВ путем отключения вводных выключателей на стороне 35 кВ (СН I) и 10 кВ (СН II) подстанций.

На рис. 3 представлена схема замещения аварийного режима, при котором выведена в ремонт одна из линий 110 кВ «Фрунзенская» – «Томаровка» одновременно с аварийным отключением второй линии. В табл. 3 представлены значения напряжений на шинах подстанций при исходной нагрузке с отпайками РПН и ПБВ в крайних верхних положениях на подстанциях: «Ивня», «Ракитное», «Готня», «Малиновка», «Красная Яруга», «Грайворон», «Борисовка», «Томаровка».

Таблица 3.

Уровни напряжений на шинах подстанций в аварийном режиме

Подстанция	Уровень напряжения	Лето		Зима	
		U, кВ	$\Delta U$ , кВ	U, кВ	$\Delta U$ , кВ
«Крапивенская»	ВН	111,44	3,56	110,81	4,19
	НН	10,46	0,54	10,43	0,57
«Строитель»	ВН	110,61	4,39	109,89	5,11
	НН 1Т	6,07	0,53	6,02	0,28
	НН 2Т	6,17	0,43	6,15	0,45
«Рудник-2»	ВН	109,71	5,29	108,87	6,13
	НН	6,07	0,53	6,03	0,57
«Рудник»	ВН	109,57	5,43	108,72	6,28
	СН	35,90	2,60	35,74	2,76
	НН	6,04	0,56	6,02	0,58

Продолжение табл. 3.

Подстанция	Уровень напряжения	Лето		Зима	
		U, кВ	$\Delta U$ , кВ	U, кВ	$\Delta U$ , кВ
«Ивня»	ВН	100,93	14,07	97,67	17,33
	СН	34,81	3,69	33,66	4,84
	НН	11,21	0,21	10,85	0,15
«Ракитное»	ВН	76,57	38,43	68,82	46,18
	СН	26,19	12,31	23,44	15,06
	НН	8,45	2,55	7,55	3,45
«Красная Яруга»	ВН	70,72	44,28	61,89	53,11
	СН	23,80	14,70	20,77	17,73
	НН	7,59	3,41	6,64	4,36
«Готня»	ВН	67,53	47,47	58,11	56,89
	НН	7,43	3,57	6,09	4,91
«Малиновка»	ВН	63,40	51,60	53,90	61,10
	СН	19,48	19,02	16,74	21,76
	НН	5,84	5,16	5,06	5,94
«Грайворон»	ВН	64,34	50,66	54,06	60,94
	СН	20,92	17,58	16,92	21,58
	НН	6,71	4,29	5,41	5,59
«Борисовка»	ВН	61,72	53,28	51,16	63,84
	СН	20,83	17,67	16,80	21,70
	НН	6,64	4,36	5,32	5,68
«Томаровка»	ВН	61,03	53,97	50,69	64,31
	СН	19,31	19,19	15,84	22,66
	НН	6,08	4,92	5,00	6,00

При этом регулирование напряжения при помощи устройств ПБВ может осуществляться на подстанциях «Грайворон», «Томаровка», «Рудник», «Ивня», «Ракитное», «Малиновка», «Борисовка» в обмотках 35/10 кВ трехобмоточных трансформаторов для поддержания уровня напряжения на шинах 35 (СН I) и 10 кВ (СН II).

По результатам расчета аварийного режима выявлена основная проблема Юго-Западного энергорайона – невозможность поддержания необходимого уровня напряжения на шинах 35 кВ (СН I) и 10 кВ (СН II) с помощью устройств РПН и ПБВ. Токовая нагрузка на линиях «Рудник» – «Ивня», «Ивня» – «Ракитное», «Ракитное» – «Красная Яруга» почти в 2 раза превышает предельно-допустимую токовую нагрузку для провода АС-120/19, которая составляет  $I_{\text{доп}} = 390$  А (табл. 4) [7, 11].

Таблица 4.  
Потоки мощности в аварийном режиме

Название ветви	Летний период			Зимний период			$I_{доп},$ А
	$P_{нач},$ МВт	$Q_{нач},$ МВар	$I_{max},$ А	$P_{нач},$ МВт	$Q_{нач},$ МВар	$I_{max},$ А	
Белгород 330 – Крапивенская	-40,40	-41,27	282,59	-46,77	-39,75	300,29	510
Крапивенская – Строитель	-19,22	-15,51	127,97	-22,47	-14,51	138,66	510
Строитель – Рудник-2	-28,83	-28,78	212,63	-33,86	-27,78	228,84	510
Рудник-2 – Рудник	-36,31	-34,84	264,84	-42,86	-33,61	286,99	510
Рудник – Ивня	-104,21	-80,79	694,82	-123,60	-76,47	766,82	390
Ивня – Ракитное	-83,77	-79,32	659,94	-96,11	-77,25	718,12	390
Ракитное – Красная Яруга	-61,71	-52,02	608,61	-69,22	-48,28	661,42	390
Красная Яруга – Готня	-29,78	-24,76	316,18	-32,80	-23,03	342,51	390
Готня – Малиновка	-21,10	-19,74	247,01	-20,48	-15,04	228,43	390
Малиновка – Томаровка	-7,67	-6,02	88,80	-9,82	-6,09	110,03	390
Красная Яруга – Грайворон	-21,54	-17,81	228,14	-24,55	-16,87	254,56	390
Грайворон – Борисовка	-8,98	-7,95	107,63	-9,46	-6,54	109,31	390

## В. Заключение

Если при выводе в ремонт одной из линий 110 кВ «Фрунзенская» – «Томаровка» происходит аварийное отключение второй линии, то на шинах ПС 110 кВ «Томаровка», «Малиновка», «Борисовка», «Грайворон», «Готня», «Красная Яруга» происходит снижение напряжения ниже уставки автоматики ограничения снижения напряжения, установленной на уровне 86 кВ. Это вызывает срабатывание АОСН и отключение вводных выключателей на стороне СН I и СН II. Потеря питания на напряжениях 35 кВ (СН I) и 10 кВ (СН II) приводит к массовым отключениям потребителей в Грайворонском, Борисовском, Яковлевском и Краснояружском районах. При этом аварийные отключения происходят ежегодно, их количество составляет до пяти раз в год.

Данные отключения наносят значительный экономический ущерб предприятиям промышленности, агропромышленного комплекса, компаниям по распределению и сбыту электроэнергии. Перебои в электроснабжении сказываются и на социально-значимых объектах. Для предотвращения полных отключений ПС и потребителей введены ограничения по



мощности на время плановых отключений одной из линий «Фрунзенская» – «Томаровка». Дефицит мощности при таком режиме работы в летний и зимний периоды составляет 39,9 МВт и 45,2 МВт соответственно. Решением проблемы аварийного отключения одной линии при выводе в ремонт другой и покрытие дефицита мощности может стать строительство новой линии. В качестве возможных вариантов по строительству новой ВЛ для обеспечения устойчивости напряжения в узлах энергорайона можно рассмотреть два маршрута от ПС 330 кВ «Фрунзенская» до ПС «Грайворон» или до ПС «Красная Яруга». Распределительные устройства 110 кВ обеих ПС выполнены по схеме «две рабочие системы сборных шин», данная схема обладает гибкостью по изменению количества и состава присоединений, что позволяет осуществлять новое присоединение без сложной и дорогостоящей реконструкции ПС [11]. Определение оптимального варианта строительства новой ВЛ для повышения устойчивости электрической системы 110 кВ Юго-Западного энергорайона Белгородской области требует дальнейших исследований и технико-экономических расчетов.

© Прасол Д.А., 2019

© Щекин В.А., 2019

### Библиографический список

- [1] Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фитасов А.Н. Расчетно-аналитическая модель для исследования влияния распределенной генерации на качество электрической энергии – колебания напряжения // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. С. 74-86.
- [2] Авербух М.А., Абдулвахаб М.В., Жилин Е.В., Сизганова Е.Ю. Особенности режимов распределительных электроэнергетических сетей Ирака // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 5. С. 607-616.
- [3] Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А., Севостьянов А.А. Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 37-40.
- [4] Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54-59.
- [5] Авербух М.А., Жилин Е.В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54-57.
- [6] Прасол Д.А., Нестеров М.Н. Оценка потерь активной мощности в системе электроснабжения агропромышленного холдинга // Мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы энергетики», Ноябрь 28, 2018, Белгород, Россия. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. С. 136-141.
- [7] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Альянс, 2009. – 592 с.

- [8] Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Бедретдинов Р.Ш. Исследование режимов работы узла нагрузки 20 кВ интеллектуальной равномерно-распределенной электрической сети // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1 (94). С. 185-191.
- [9] Лоскутов А.Б., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А. Оценка энергетической эффективности применения напряжения 0,95 кВ в системе электроснабжения с распределенной нагрузкой // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 73-79.
- [10] Бессонов В.О., Юдин М.А. Программный комплекс RastrWin как инструмент расчета режимов работы автономных энергетических систем // Вестник Югорского государственного университета. 2015. № S2 (37). С. 207-210.
- [11] Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Академия, 2007. – 448 с.

**D.A. Prasol, V.A. Shchekin**

## **ELECTRICAL SYSTEM 110 KV OPERATING MODES FEATURES OF SOUTH-WEST ENERGY DISTRICT OF BELGOROD REGION**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Belgorod, Russia

**Abstract.** The paper considers the 110 kV electric system of the South-West energy district of the Belgorod region. The calculation of power flows and voltage levels on the substation buses in normal and emergency operation modes completed using the RastrWin3. The places of voltage reduction below the set point of automatic voltage reduction limitation are revealed. To prevent the consequences of the emergency mode, there are power limits for the time of planned outages, there is a shortage of power in the system. Features of operating modes and the emergence of power shortages are serious problems in the 110 kV electric system of the South-West energy district of the Belgorod region. A solution to problems is proposed - the construction of a new 110 kV overhead line. There are two possible options for building an overhead line.

**Keywords:** electrical system, emergency mode, normal mode, overhead line, power shortage, power supply reliability, stability of the electrical system, substation.

### **References**

- [1] E.B. Solntsev, A.M. Mamonov and A.N. Fitasov, “Analytical model for investigation of effect of distributed generation on quality of electric energy - voltage fluctuation”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 74-86, 2018.
- [2] M.A. Averbukh, M.V. Abdulwahhab, E.V. Zhilin and E.Yu. Sizganova, “The special features of the iraqi distribution electric power networks,”, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technology*, no. 12 (5), pp. 607-616, 2019.

- 
- [3] E. Solntsev, A. Mamonov, A. Fitasov, S. Petritsky and A. Sevostianov, “The analysis of power quality, including voltage fluctuations, in distributed generation”, *Energy Safety and Energy Economy*, no. 3, pp. 37-40, 2019.
- [4] G.Ya. Vagin and A.L. Kulikov, “Electricity quality in power supply systems. Analysis of rationing and control methods”, *Electric stations*, no. 6 (1055), pp. 54-59, 2019.
- [5] M.A. Averbukh and E.V. Zhilin, “O poteryakh elektroenergii v sistemakh elektro-snabzheniya individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva [About electricity losses in power supply systems of individual housing construction]”, *Energetik*, no. 6, pp. 54-57, 2016 (in Russian).
- [6] D.A. Prasol and M.N. Nesterov, “Estimation of active power losses in the power supply system of the agro-industrial holding”, in proc. All-Russ. scient. and pract. conf. “*Aktual'nye Voprosy Energetiki [Actual Issues of Energy]*”, Nov. 28, 2019, Belgorod, Russia, pp. 136–141 (in Russian).
- [7] V.I. Idel'chik, *Elektricheskie sistemy i seti [Electrical systems and networks]*. Moscow: Al'yans, 2009 (in Russian).
- [8] A.B. Loskutov, E.N. Sosnina, A.A. Loskutov and R.Sh. Bedretdinov, “Operating modes research of knot of loading 20 kV in the uniformly-distributed smart grids”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 1 (94), pp. 185-191, 2012.
- [9] A.B. Loskutov, A.N. Fitasov and S.A. Petritskiy, “The energy efficiency assessment of the application of 0.95 kV voltage in the power supply system with distributed load”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (126), pp. 73-79, 2019.
- [10] V.O. Bessonov and M.A. Yudin, “RASTRWIN software package as a tool for the calculation of modes of autonomous energy systems”, *Yugra State University Bulletin*, vol. S2, no. 37, pp. 207-210, 2015.
- [11] L.D. Rozhkova, L.K. Korneeva and T.V. Chirkova, *Elektrooborudovanie stancij i podstancij [Electrical equipment of stations and substations]*. Moscow: Akademiya, 2007 (in Russian).

УДК 621.314

Е.В. Калинин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проводится анализ динамических процессов перемагничивания шихтованных магнитных систем силовых трансформаторов методом численных расчетов электромагнитного поля в слоистой среде с нелинейностью магнитных свойств и наличием межлистовой электропроводности. Исследуется влияние сложного характера магнитных свойств текстурованных электротехнических сталей на потери в магнитопроводах. Предлагаются результаты расчета нелинейного поверхностного эффекта в шихтованных сердечниках из анизотропных кремнистых сталей на основе нормализованного подхода к магнитным характеристикам материала и динамике перемагничивания. Разработаны механизмы обобщенного подхода для выработки рекомендаций на оптимальное применение листовой электротехнической стали в сердечниках силовых трансформаторов. Изучены особенности формирования потерь в нелинейной анизотропной плоскостойкой среде применительно к условиям перемагничивания шихтованных магнитных систем силовых трансформаторов. Разделено влияние на распределение магнитного поля и потери анизотропии и нелинейности магнитных свойств, линейных размеров перерезного сечения слоистого сердечника и динамики перемагничивания с использованием двух обобщенных параметров: коэффициента нелинейности  $K_n$  и коэффициента динамики  $\xi$ .

**Ключевые слова:** гистерезис, коэффициент динамики, магнитная анизотропия, межлистовая электропроводность, нелинейность, потери на вихревые токи, силовые трансформаторы, холоднокатаная электротехническая сталь, шихтованный сердечник, электромагнитное поле.

### 1. Актуальность. Постановка задачи

Шихтованные сердечники (ШС) силовых трансформаторов, работающих на промышленной частоте  $f = 50$  Гц, представляют собой сложные распределенные системы, магнитные характеристики которых определяются совокупным действием различных факторов [1,2]. Последние характеризуются наличием гистерезиса и анизотропии, а электроизоляционное покрытие между слоями имеет конечные значения удельного поверхностного сопротивления [2,3].

Исследование динамических процессов в ШС при наиболее полной постановке предполагает рассмотрение задачи трехмерного электромаг-

нитного поля (ЭМП) в плоскостой ферромагнитной среде с нелинейными магнитными свойствами. Математическое моделирование ЭМП при такой постановке становится затруднительным. Необходимо сузить задачу исследования. Полагаем, что магнитный поток полностью сосредоточен в ШС, и задача ЭМП может быть сформулирована как внутренняя краевая. Магнитные свойства стали считаем полученными при заданной частоте и форме магнитного потока [3,4].

Решение поставленной задачи упрощается в связи с наличием у ШС слоистой структуры. Чередование в магнитопроводе слоев проводящего ферромагнитного и изоляционного немагнитного материалов приводит к упорядочиванию распределения магнитного поля и вихревых токов (ВТ) по слоям.

С учетом принятых выше допущений о постоянстве магнитного потока в любом сечении ШС и однородности слоистой структуры материала при согласованной шихтовке пластин сердечника, когда направления прокатки (НП) отдельных пластин совпадают, считаем распределение магнитного поля в ШС плоским (двухмерным). При этом плоскости, в которых замыкаются контуры ВТ, перпендикулярны плоскости прокатки пластин сердечника и не оказывают влияния на распределение магнитного поля в этой плоскости.

В работе [5] методом математического моделирования исследованы особенности влияния магнитной анизотропии на распределение магнитного поля в ШС кольцевой формы. Расчеты произведены на основе решения плоской задачи магнитостатики с привлечением векторных характеристик намагничивания текстурованных сталей. Получено экспериментальное подтверждение правильности выбранного подхода.

Показана необходимость учета пространственного угла  $\psi$  между векторами индукции  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля в плоскости прокатки листовой стали, оказывающего принципиальное влияние на характер распределения  $\vec{B}$ . Отмечается необходимость использования магнитных свойств текстурованных сталей для заданной частоты [4].

Известные исследования не позволяют однозначно ответить на вопрос о степени влияния неоднозначности [6-9] и нелинейности магнитных свойств [2, 10, 11] на ЭМП и потери на ВТ в изотропном ШС. Для анизотропных сред такие исследования не проводились.

Полагаем, что основные динамические процессы связаны с ВТ в отдельных пластинах, т.е., поверхностный эффект не оказывает влияния на перераспределение магнитного поля в сердечнике в целом, а влияние ВТ, связанных с наличием межлистовой электропроводности в ШС, мало [12].

В данном случае анализ трехмерного ЭМП удастся свести к исследованию совокупности последовательно рассматриваемых более простых математических моделей:

- проникновение поля в отдельной пластине сердечника;
- динамических процессов в массивном сердечнике прямоугольного сечения.

## II. Уравнения ЭМП в шихтованном сердечнике

Вид и структура уравнений ЭМП, определяющих особенности динамических процессов в материальных средах, зависят от свойств рассматриваемой среды и частоты поля. Условия работы ШС при промышленной частоте позволяют утверждать, что свободными пространственными зарядами и токами смещения при перемагничивании рассматриваемой плоскостной среды можно пренебречь. В этом случае ЭМП является квазистационарным [13], и при отсутствии сторонних токов для каждой произвольной точки неподвижной проводящей среды подчиняется системе уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial t, \quad (2)$$

и условиям:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad \operatorname{div} \bar{J} = 0, \quad (3)$$

где  $\bar{H}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{J}$  и  $\bar{E}$  – вектора напряженности и индукции магнитного поля, плотности тока и напряженности электрического поля, соответственно.

Для обеспечения полноты системы уравнений (1) – (3) устанавливаются связи между соответствующими векторами электрического и магнитного полей через физические параметры материальной среды:

$$\bar{J} = \hat{\gamma} \cdot \bar{E}; \quad \hat{\nu}_o(\bar{B}) = \partial \bar{H} / \partial \bar{B}, \quad (4)$$

где  $\hat{\gamma}$  – линейный тензор удельной электропроводности;

$\hat{\nu}_o(\bar{B})$  – нелинейный тензор удельного дифференциального магнитного сопротивления.

Рассмотрим сердечник прямоугольного сечения с однородным периодически изменяющимся во времени плоскопараллельным магнитным полем, шихтованный согласованным способом из анизотропных стальных

пластин толщиной  $d$ , когда НП соседних пластин совпадают (рис. 1, а). В каждый момент времени в произвольной точке пластин вектор  $\vec{B}$  находится в плоскости прокатки пластин и составляет с НП неизменный угол  $\alpha$  (рис. 1, б). Вектор  $\vec{H}$  также находится в плоскости прокатки, но его направление из-за магнитной анизотропии в общем случае отличается от направления  $\vec{B}$  на угол  $\psi$  (рис. 1, б).

В принятой на рис. 1 системе координат плоскости прокатки пластин параллельны координатной плоскости – « $yOz$ ». В соответствии с наложенными на вектор  $\vec{B}$  ограничениями его направление совпадает с осью « $z$ », модуль не зависит от « $z$ » –  $\partial B_z / \partial z = 0$ . Годограф вектора  $\vec{B}(t)$  пульсирует вдоль оси « $z$ ». Поэтому векторное уравнение (1) имеет только составляющие с индексом « $z$ » [14], а вектор  $\vec{E}$  – с индексами « $x$ » и « $y$ », поскольку:

$$\text{rot } \vec{E} = \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \cdot \vec{k}; \quad (5)$$

В соответствии с (3) и (5) ВТ имеют замкнутые контуры в плоскостях, перпендикулярных оси действия вектора  $\vec{B}$  (рис. 1, а).

Из уравнения (1), учитывая ограничение (5), получаем:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial H_z}{\partial y} \cdot \vec{i} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \cdot \vec{j}; \quad (6)$$

Из равенства (6) следует, что в динамических процессах принимает участие только составляющая напряженности  $H_z$ , направленная вдоль оси действия вектора  $\vec{B}$  (рис. 1, б).

### III. Расчетные уравнения ЭМП в обобщенном виде

При решении системы (1) – (2) с учетом (4) наиболее часто пользуются приведением к одному уравнению с одной неизвестной векторной величиной. Вывод расчетного уравнения удобно производить относительно вектора  $\vec{B}$ , имеющего одну составляющую  $B_z$  (в дальнейшем символ при  $B_z$  опускаем).

Допуская независимое действие ВТ, замыкающихся в отдельных пластинах и по всему периметру поперечного сечения (рис. 1, а), из (1) – (6) для обеих задач получаем дифференциальное уравнение общего вида:

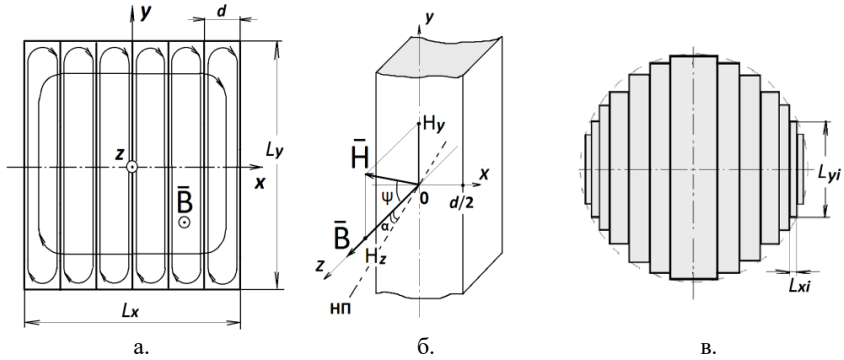


Рис. 1. Контуры вихревых токов в ШС прямоугольного сечения (а); ориентация векторов магнитного поля в анизотропной ферромагнитной пластине (б); ШС со ступенчатым сечением (в)

$$\frac{1}{\gamma_y} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_o(B) \cdot \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{1}{\gamma_x} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_o(B) \cdot \frac{\partial B}{\partial y} \right) = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (7)$$

где  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$  – удельные электропроводности по осям « $x$ » и « $y$ » поперечного сечения с линейными размерами  $l_x$  и  $l_y$ , соответственно (рис. 1, а);  $\nu_o$  – нелинейное удельное магнитное сопротивление скалярной магнитной характеристики  $H_z(B)$  по оси « $z$ ».

Для удобства анализа и практического применения результатов моделирования приводим уравнение (7) к обобщенному виду [15] через безразмерные координаты:

$$x = \frac{x}{l_x}; y = \frac{y}{l_y}; \tau = t \cdot f, \quad (8)$$

и нормализованную магнитную характеристику  $h(b)$ , где:

$$h = H / H_{mc}; b = B / B_{mc}; \mathbf{v} = \mathbf{v}(b) = \frac{\partial h}{\partial b} = \mathbf{v}_{gr}(b) + \mathbf{v}_r(b), \quad (9)$$

а  $\mathbf{v}_{gr}$  и  $\mathbf{v}_r$  – относительные значения безгистерезисной и гистерезисной составляющих удельного магнитного сопротивления (4), исходя из соответствующей структуры для  $h(b)$  по методу Л.А. Бессонова [4]:

$$h(b) = h_{gr}(b) + h_r(b). \quad (10)$$



Влияние характеристики  $H_c(B)$  на динамику учитывается коэффициентами, привязанными к реальным физическим параметрам:

$$K_{нл} = \mu_{\max} / \mu_6; K_{нд} = H_c / H_1, \quad (11)$$

$K_{нл}$  – коэффициент нелинейности, возрастающий с насыщением безгистерезисной кривой; на рис 4, а приведены зависимости  $h_{6r}(b)$  [4] при различных  $K_{нл}$ ;

$K_{нд}$  – коэффициент неоднозначности гистерезисной характеристики  $H_r(B)$ ; при этом  $H_c$  – коэрцитивная сила [4];

$\mu_{\max} = B_1/H_1$  – максимальная магнитная проницаемость материала;

$B_1$  и  $H_1$  – координаты конца линейного участка зависимости  $H_{6r}(B)$  [4];

$\mu_6 = B_{мс}/H_{мс}$  – базисная магнитная проницаемость материала, соответствующая режиму перемагничивания ШС;  $H_{мс} = H(B_{мс})$ ;  $B_{мс}$  – амплитуда средней по сечению магнитной индукции.

Для определения  $\mathbf{v}$  желательна аналитическая форма представления структурных составляющих (10). Для описания  $h_{6r}(b)$  воспользуемся аппроксимацией, предложенной в [15]. Для зависимости  $h_r(b)$  – дифференциальной моделью пульсирующего гистерезиса, удовлетворяющей правилам Маделунга [16, 17].

С учетом (8), (9) уравнение (7) преобразуется к нормализованному виду:

$$\frac{1}{\xi_x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{v}(b) \cdot \partial b / \partial x) + \frac{1}{\xi_y^2} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\mathbf{v}(b) \cdot \partial b / \partial y) = \frac{1}{\pi} \cdot \partial b / \partial \tau, \quad (12)$$

где:  $\xi_x$ ;  $\xi_y$  – коэффициенты динамики [10], отвечающие за развитие поверхностного эффекта по осям «x» и «y», соответственно:

$$\xi_x = l_x \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_y}; \xi_y = l_y \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_x}, \quad (13)$$

Анализ левой части уравнения (12) показывает, что степень участия в динамических процессах каждого из линейных размеров зависит от отношения «весовых» коэффициентов:  $(1/\xi_x^2)$  и  $(1/\xi_y^2)$ . При этом большее влияние на динамику всегда оказывает меньший из коэффициентов  $\xi$ .

Для отдельной пластины:  $l_x = d$ ;  $l_y = L_y$ , при  $d \ll L_y$  (рис. 1, а);  $\gamma_x = \gamma_y = \gamma_{ст}$  – удельная электропроводность стали. Тогда:

$$\xi_x = d \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_y}; \xi_y = L_y \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_x}; \xi_x / \xi_y = d / L_y \text{ и } \xi_x \ll \xi_y.$$

Умножая почленно левую и правую часть уравнения (12) на  $(\xi_x^2)$ , получаем после преобразования расчетное дифференциальное уравнение проникновения электромагнитного поля в прямоугольную стальную пластину в канонической форме:

$$\mathbf{v} \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial x^2} + \frac{1}{\text{Ш}^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{b}} \cdot \left( \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\text{Ш}^2} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial y} \right)^2 \right) = \frac{\xi_x^2}{\pi} \cdot \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \tau}, \quad (14)$$

где  $\kappa = \xi_y / \xi_x \gg 1$ .

Для шихтованного пакета пластин:  $l_x = L_x$ ;  $l_y = L_y$  – и оба линейных размера соизмеримы (Рис. 1, а);  $\gamma_y = \gamma_{ст}$ ;  $\gamma_x = \gamma_{мл}$  – удельная межлистовая электропроводность.

ГОСТ [18] нормирует коэффициент сопротивления изоляционного покрытия  $R_n$ , как статистическую величину, определяемую на тестере Франклина. Фактически это измеряемое методом амперметра и вольтметра сопротивление на единицу площади однослойной изоляции стальной пластины при фиксированном давлении на электроды. Для отечественных текстурованных сталей  $R_n \geq 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ .

Рассчитаем эквивалентную величине  $R_n$  удельную межлистовую электропроводность пакета пластин  $\gamma_{мл}$ . Учитывая, что изоляция пластин двухсторонняя, удельное сопротивление межлистовой изоляции:

$$\rho_{мл} = 2 \cdot R_n / d, \text{ а удельная электропроводность: } \gamma_{мл} = 1 / \rho_{мл}.$$

При  $d = 0,3 \text{ мм}$   $\rho_{мл} \geq 13,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Тогда:  $\gamma_{мл} \leq 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$  при  $\gamma_{ст} = 2 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ .

Для пакета пластин коэффициенты динамики по осям координат:

$$\xi_x = L_x \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_{ст}}; \xi_y = L_y \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_6 \cdot \gamma_{мл}}; \xi_y / \xi_x = L_y / L_x \cdot \sqrt{\gamma_{мл} / \gamma_{ст}},$$

при этом всегда справедливо:  $\xi_y \ll \xi_x$ .

При наличии у ШС прямоугольного поперечного сечения межлистовой электропроводности расчетное дифференциальное уравнение динамических процессов в пакете пластин принимает вид, симметричный уравнению (14) для пластины, но с коэффициентом динамики  $\xi_y$  в правой части:

$$\mathbf{v} \cdot \left( \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \left( \frac{1}{\sigma^2} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial y} \right)^2 \right) = \frac{\xi^2}{\pi} \cdot \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}, \quad (15)$$

где  $\kappa = \xi_x / \xi_y \gg 1$ .

Записанные в безразмерных координатах уравнения (14), (15) позволяют свести динамические процессы (при заданной форме магнитного потока) к зависимости от коэффициентов  $K_n$ ;  $K_{нд}$  и  $\xi$ .

#### IV. Результаты расчета ЭМП в тонкой пластине

Динамические процессы в ШС во многом определяются особенностями проникновения ЭМП в стальных пластинах сердечника. Поэтому исследование влияния различных факторов на поверхностный эффект и потери производим для отдельной пластины ШС.

Поскольку толщина пластин ШС много меньше ширины  $d \ll L_y$ ;  $1/\kappa^2 \rightarrow 0$ , для тонкой пластины у уравнения (14) остается зависимость только от одной пространственной координаты « $x$ » вдоль толщины  $d$ :

$$\mathbf{v} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial x^2} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial x} \right)^2 = \frac{\xi_x^2}{\pi} \cdot \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}, \quad (16)$$

Решение краевой задачи ЭМП для отдельной тонкой пластины с синусоидальной формой средней по сечению магнитной индукции на основе расчетного уравнения (16) производим численным итерационным методом прогонки с релаксацией по  $\mathbf{v}$  при неявно заданных граничных условиях [19].

Для учета влияния гистерезиса сравниваем результаты моделирования при полной структуре  $\mathbf{v}(b)$  (9) и при отсутствии гистерезиса. При этом относительные величины полных удельных потерь  $p_n$  рассчитаны с использованием зависимости  $H_{гр}(B_c)$  [4], удельных гистерезисных потерь  $p_r$  – по амплитудным значениям петли, а удельных потерь на ВТ  $p_v$  определяется, как разность полных и гистерезисных потерь:  $p_v = p_n - p_r$ .

Исследования проводились в диапазоне значений:  $\xi = (0 \div 4)$ ;  $K_n = (1 \div 50)$ . Учитывалось, что для современных электротехнических сталей вдоль НП –  $K_{нд} \leq 1$ , поперек НП –  $K_{нд} < 3$ .

Численные расчеты показали, что при  $K_n > 1$  влияние гистерезиса сводится к незначительному снижению динамического перераспределения магнитного поля и потерь на ВТ. На рис. 2, б представлены зависимости  $\delta p_r(\xi)$  при  $K_{нд} = 3$  и различных  $K_n = \text{const}$ , где  $\delta p_r = (p_v/p_v^r - 1) \cdot 100\%$  – относительная погрешность расчета потерь на ВТ в пластине без учета гистерезиса;  $p_v^r$ ,  $p_v$  – потери на ВТ соответственно при учете и отсутствии гистерезиса. Для кривых  $\delta p_r(\xi)$  характерно наличие отрицательного экстремума  $\delta p_r$ , значения которого уменьшаются с ростом  $K_n$ .

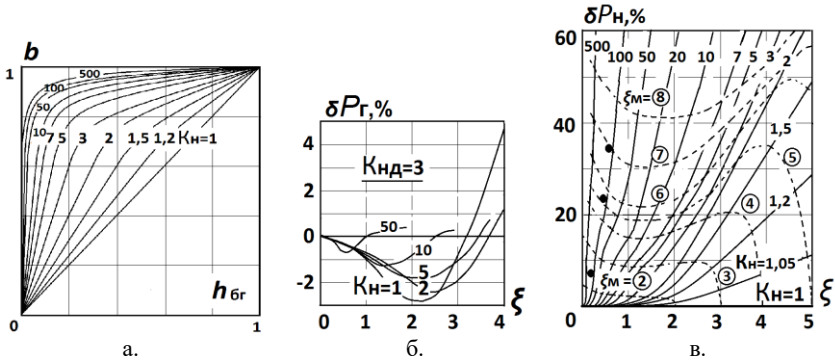


Рис. 2. Зависимости для различных  $K_n = \text{const}$ :  $h_{бр}(b)$  (а);  $\delta P_r(\xi)$  – (б);  $\delta P_n(\xi)$  (в) – точками отмечены значения, полученные в работе [11]

Для предъявляемых к электротехническим сталям условий по динамике, соответствующих значениям  $\xi_m < 2$ , влияние гистерезиса даже при наибольших значениях коэффициента  $K_{нд}$  не выходит за пределы снижения вихревых потерь на  $\delta P_r = -(2 \div 3) \%$  (рис. 2, б).

Исследование влияния нелинейности на распределение магнитного поля и вихретоковые потери  $p_v$  производим с использованием зависимости  $v(b)$  (9) без учета гистерезиса. Диапазон значений  $K_n$  расширяем до  $K_n = (1 \div 500)$  (рис. 2, а).

Полученное в результате численных расчетов семейство зависимостей  $\delta P_n(\xi)$  на рис. 2, в характеризуют процентное увеличение удельных потерь на ВТ по отношению к линейному случаю ( $K_n = 1$ ) с ростом динамики перемагничивания при различных  $K_n = \text{const}$ .

При  $K_n = 1$  значения  $p_v$  совпадают с рассчитанными по формуле удельных потерь на ВТ в проводящей пластине при  $\mu = \text{const}$  [10]. Пунктиром на рис. 2, в обозначены линии максимального значения коэффициента динамики  $\xi_m$  для различных  $\xi_m = \text{const}$ . Их пересечение с кривыми  $\delta P_n(\xi)$  при различных  $K_n = \text{const}$  указывают на фактическое ограничение наибольших процентов увеличения потерь на вихревые токи  $\delta P_n$ , вызванных влиянием нелинейности при данном значении  $\xi_m$ . Так при  $\xi_m = 2$  даже для  $K_n = 500$  увеличение потерь  $\delta P_n \leq 4 \%$  (рис. 2, в).

Публикуемые в работах [2, 10, 11] высокие значения увеличения потерь  $\delta P_n$ , достигающие  $\delta P_n = (50 \div 70) \%$  имеют чисто теоретическое значение. На рис. 2, в они соответствуют значениям  $\xi_m = (7 \div 8)$  и более. Реальные причины аномального увеличения потерь на ВТ связаны с наличием у текстурованных сталей крупной полосовой ДС и являются следствием динамических процессов упругого движения доменных границ

[3]. Характер влияния нелинейности кривой  $h_{br}(b)$  на распределение ЭМП и вихревые потери иллюстрируется эпюрами распределения магнитной индукции  $b(x)$  в разные моменты времени на половине толщины пластины, представленными на рис. 3, а-в. Рассмотрен предельный случай проникновения ЭМП в пластину при резком поверхностном эффекте -  $\xi_m = 4$  [10], выходящий за рамки условий ( $\xi_m < 2$ ).

В линейном режиме ( $K_n = 1$ ;  $\xi = \xi_m$ ; рис. 3, а) наблюдается многократное возрастание амплитуды индукции  $b_m$  на поверхности, в центре пластины ее уровень значительно снижен. Эти результаты находятся в полном соответствии с представленными в [10] аналитическими зависимостями. С ростом насыщения коэффициент динамики  $\xi$  уменьшается (рис. 3, а-в):  $\xi = \xi_m / \sqrt{K_n}$ . Даже небольшая нелинейность  $K_n = 2$  ( $\xi = 2,83$ ) на рис. 3, б существенно снижает перераспределение амплитуды  $b_m$  по толщине пластины. Увеличение коэффициента нелинейности до  $K_n = 100$  и  $\xi = 0,4$  (рис. 3.в) практически выравнивает распределение  $b_m(x)$ , но резко увеличивает несинусоидальность  $b(\tau)$  по слоям пластины [20].

Таким образом, действие нелинейности  $h_{br}(b)$  двоякое:

- обеспечивает полное проникновение магнитного поля по толщине пластин;
- увеличивает вихрековые потери за счет высших гармоник в зависимостях  $b(\tau)$  во внутренних слоях пластин при сохранении синусоидальной средней по сечения магнитной индукции  $b_{cp}(\tau)$ .

## V. Результаты расчета ЭМП

### в слоистом пакете прямоугольного сечения

При расчете ЭМП и потерь в ШС от межлистовой электропроводности слоистый пакет пластин прямоугольного сечения заменяется эквивалентным сплошным, выполненным из однородного материалом с линейной  $90^\circ$  анизотропией электропроводности с осями анизотропии: в плоскости шихтовки с удельной электропроводностью  $\gamma_{ст}$  и перпендикулярно плоскости шихтовки -  $\gamma_{мл}$ . В качестве безгистерезисной магнитной характеристики используется амплитудная зависимость  $h_{tr}(b_c)$  пластины [4].

Такая замена слоистой среды «средненной» [21] сплошной возможна только в принятой постановке задачи:

- плоскопараллельного магнитного поля;
- согласованной шихтовке пластин;
- расположения вектора  $\vec{B}$  в плоскости прокатки пластин, то есть при отсутствии составляющей магнитной индукции  $B_n$ , перпендикулярной плоскости шихтовки.

Проведенные исследования особенностей динамических процессов от нормальной составляющей магнитного потока в ШС [22, 23] свидетельствуют о резком поверхностном эффекте, происходящем в плоскости пла-

стин при уровнях динамики  $\xi_z > 10$ . Коэффициент динамики  $\xi_z$  зависит от ширины пластин и магнитной проницаемости  $\mu_d$  в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки. Значения  $\mu_d$  на несколько порядков ниже, чем в направлении прокатки. Поэтому предлагаемое в работе [21] «осреднение» слоистой структуры пакета пластин для общего случая направления вектора  $\vec{B}$  является неприемлемым.

В уравнении (15) при  $\xi_y/\xi_y \approx \gamma_{ст}/\gamma_{мл} \gg 1$  также можно положить  $1/\kappa^2 \rightarrow 0$  и расчетное уравнение принимает вид, симметричный (16), с зависимостью от одной координаты «y» вдоль ширины пластин  $L_y$ :

$$\mathbf{v} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{b}}{\partial y^2} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{b}} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial y} \right)^2 = \frac{\xi_y^2}{\pi} \cdot \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \tau}. \quad (17)$$

Результаты исследования влияния нелинейности и динамики, определяемой коэффициентами  $K_n$  и  $\xi$ , проведенного для отдельной пластины, распространяются и на пакет пластин. При этом соотношение коэффициентов динамики пластины  $\xi_{пл}$  и пакета пластин  $\xi_{пк}$  даже при ширине пластин  $L_y = 0,5$  м и толщине  $d = 0,3$  мм:

$$\xi_{пк} / \xi_{пл} = L_y / d \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{мл}}{\gamma_{ст}}} < 0,3. \quad (18)$$

Это означает, что для потерь на вихревые токи в ШС от межлистовой электропроводности максимальные значения  $\xi_{м.пак} < 0,6$  и процессы динамики приближены к линейным.

В соответствии с (18) и результатами [2] отношение удельных потерь на ВТ пакета  $p_{пк}$  и пластины  $p_{пл}$  даже при ширине пластин  $L_y = 0,5$  м подчиняется неравенству:

$$p_{пк} / p_{пл} = \left( \xi_{пк} / \xi_{пл} \right)^2 < 0,1.$$

Представляют практический интерес значения  $\kappa$ , при которых возможно пренебречь динамическими процессами вдоль одной координат прямоугольного сечения задачи ЭМП «пластины» или «пакета». При значениях  $\xi_m < 2$  и различных  $K_n$  проведено сравнение результатов расчета удельных вихретоковых потерь  $p_2$  для двухмерной задачи при различных значениях  $\kappa$  с использованием уравнения (14) и потерь  $p_1$  – для одномерной постановки задачи – с уравнением (16).

На рис. 3, г представлена зависимость  $p_2/p_1(x)$ , характер которой во всем диапазоне значений  $K_H$  остается практически неизменным. Расчеты показали, что уже при  $x = 10$  отличие значений потерь  $p_1$  и  $p_2$  составляет менее 2 %, а при  $x = 20$  – менее 0,5 %.

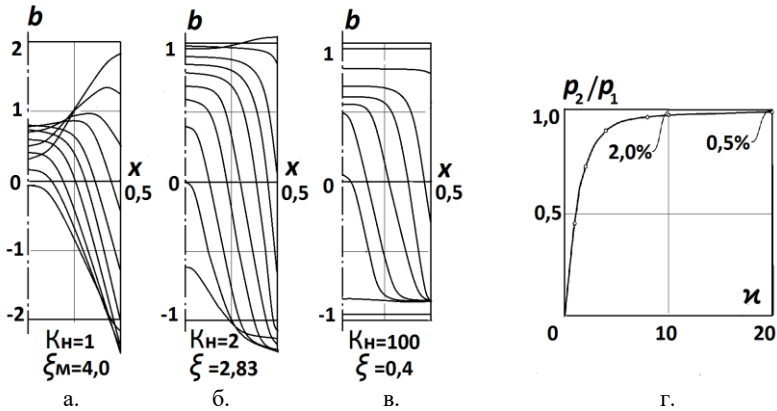


Рис. 3. Эпюры  $b(x)$  в стальной пластине при  $\xi_M = 4$  и различных  $K_H = \text{const}$  через равные промежутки времени за половину периода (а; б; в); зависимость  $p_2/p_1(x)$  (г)

Для задачи «пластины»  $x = L_y/d$ . Это означает, что при отношении  $L_y/d \geq 10$  при рассмотрении динамических процессов и удельных потерь в пластине можно использовать представленные выше результаты обобщенного анализа. Так, на основе результатов расчета плоской задачи магнитостатики [5] всегда можно разделить магнитопровод на области  $L_y/d \geq 10$ ;  $L_z/d \geq 10$ , в пределах которых магнитное поле может быть аппроксимировано, как однородное и плоскопараллельное.

Для задачи «пакета»  $x = L_x/L_y\sqrt{\gamma_{ст}/\gamma_{мл}} \gg 10$  всегда. Появляется возможность распространить результаты на ШС мощных силовых трансформаторов со ступенчатым сечением (рис. 1, в). Линейные размеры поперечного сечения ( $L_{xi}$ ;  $L_{yi}$ ) отдельных секций пакета могут отличаться более, чем на порядок. Даже при таких условиях для всех секций справедливо  $x > 100$ , что позволяет определять потери на ВТ от межлистовой электропроводности для каждой секции ступенчатого пакета независимо с использованием линейной формулы удельных потерь [2,10].

## VI. Обсуждение результатов

В настоящей работе исследованы динамические явления в нелинейном анизотропном шихтованном сердечнике. Задача электромагнитного поля сведена к совокупности независимых двумерных пространственных

задач стальной пластины и слоистого сердечника с наличием межлистовой электропроводности. Низкий уровень динамики от межлистовой электропроводности и протекание вихревых токов «пластин» и «пакета» во взаимно перпендикулярных направлениях при  $\kappa \gg 10$  подтверждает правомерность принятия допущения о суперпозиции этих процессов.

Влияние магнитной анизотропии при этом ограничивается использованием скалярной характеристики намагничивания в направлении намагничивания.

## VII. Выводы

Использование безразмерных координат и нормализованных магнитных характеристик позволило установить общие закономерности нелинейного поверхностного эффекта в шихтованных сердечниках для текстурованных сталей на промышленной частоте:

1) для рассматриваемых динамических процессов в плоскостойкой среде зависимость удельных вихревых потерь от соотношения линейных размеров сводится к зависимости от соответствующих коэффициентов динамики в сторону меньшего из них; при отличии более, чем в десять раз, влиянием большего коэффициента динамики на распределение магнитного поля и удельные потери можно пренебречь;

2) в отдельных пластинах пакета при неизменном магнитном потоке удельные вихревые потери зависят только от их толщины и удельной электропроводности стали; дополнительные удельные потери на вихревые токи в пакете пластин – только от ширины пластин и удельной межлистовой электропроводности;

3) влиянием магнитного гистерезиса на вихревые токи в шихтованных сердечниках силовых трансформаторов можно пренебречь, а нелинейность магнитных свойств незначительно увеличивает удельные потери на вихревые токи даже при больших уровнях насыщения стали.

© Калинин Е.В., 2020

## Библиографический список

- [1] Лизунов С.Д. Итоги Сессии СИГРЭ 1988г. Трансформаторостроение // Электричество. 1989. № 8. С. 37-45.
- [2] Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. – 392 с.
- [3] Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992. – 272 с.
- [4] Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 2 (121). С. 96-105.



- [5] Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Ч. 2. Экспериментальное обоснование применения при расчетах магнитного поля векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. №3 (122). С. 71-80.
- [6] Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В. Критериальная оценка электромагнитных явлений в ферромагнитной пластине с прямоугольным циклом // Электричество. 1980. № 4. С. 58-61.
- [7] Захаров В.А., Попов Э.И., Шайдюк Л.П. К расчету процесса динамического перемагничивания проводящего ферромагнитного листа // Электричество. 1984. № 11. С. 64 – 66.
- [8] Черкашин Ю.С. Процесс и энергия намагничивания листового магнитопровода при прямоугольном напряжении // Электричество. 1978. № 6. С. 60-64.
- [9] Coulson M.A., Simpson R.R.S., Slater R.D., Wood W.S. Eddy current losses in steel taking into account the effect of hysteresis // International Symposium on electro-dynamics. Forces and losses in transformers. Part 2, 1979, Lodz, Poland. P. 229-242.
- [10] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Москва: Энергия, 1967. – 208 с.
- [11] Болдырев Е.А., Зихерман М.Х., Камнева Н.П. Переменное электромагнитное поле в проводящем листе с нелинейной магнитной проницаемостью // Электричество. 1974. № 3. С. 61-66.
- [12] Калинин Е.В., Любвиный В.И. Расчет потерь на вихревые токи в массивных и шихтованных ферромагнитных сердечниках // «Электропривод и автоматизация в машиностроении». М.: ВЗМИ, 1980. С. 138-143.
- [13] Поливанов К.М. Электродинамика вещественных сред. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
- [14] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1967. – 608 с.
- [15] Калинин Е.В. Нормализованный подход к моделированию потерь на перемагничивание в листовой электротехнической стали // «Электрооборудование промышленных установок», 1986, Горький, СССР. Горький: ГПИ. С. 159-164.
- [16] Глухов В.П., Шмидт Р.К. Нормализация характеристик намагничивания. Рига: Зинатне, 1974. – 195 с.
- [17] Дикань А.И., Калинин Е.В. Оценка точности расчета ферромагнитных устройств на основе дифференциальных уравнений намагничивания // Науч.-техн. конф. «Вентильные преобразователи с улучшенными энергетическими показателями», 1977, Горький, СССР. С. 49-50.
- [18] ГОСТ 12119.8-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения коэффициента сопротивления изоляционного покрытия. Введ. 1999-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. – 4 с.
- [19] Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. – 440 с.
- [20] Потапов Л.А., Маклаков В.В. К вопросу об изменении магнитной проницаемости в массивном магнитопроводе // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2001. № 4-5. С. 9-13.
- [21] Колесников Э.В. Локальная структура и аппроксимация полей (Ч. 3) // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2001. № 1. С. 3-13.

- [22] Yagisawa T., Takekoshi Y., Wada S. Magnetic properties of laminated steel sheets for normal fluxes // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1982. № 26. P. 340-342.
- [23] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Резкий поверхностный эффект в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов // *Интеллектуальная электротехника*. 2019. № 4. С. 52-67.

**E.V. Kalinin**

## **MODEL OF LOSSES IN LAMINATED CORES OF POWER TRANSFORMERS**

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

**Abstract.** The dynamic processes of magnetization reversalization of laminated magnetic systems of power transformers are analyzed by the method of numerical calculations of the electromagnetic field in a layered medium with nonlinearity of magnetic properties and the presence of inter-sheet electrical conductivity. The influence of the complex nature of the magnetic properties of textured electrical steels on losses in the magnetic cores is investigated. The results of calculating the nonlinear surface effect in laminated cores made of anisotropic silicon steels are proposed based on a normalized approach to the magnetic characteristics of the material and the dynamics of magnetization reversal. Mechanisms of a generalized approach have been developed to develop recommendations for the optimal use of sheet electrical steel in the cores of power transformers. The features of the formation of losses in a nonlinear anisotropic plane-layered medium in relation to the magnetization reversal conditions of laminated magnetic systems of power transformers. The influence on the distribution of the magnetic field and the loss of anisotropy and non-linearity of magnetic properties, the linear dimensions of the cross section of the layered core and the magnetization reversal dynamics are divided using two generalized parameters: the nonlinearity coefficient  $K_n$  and the dynamics coefficient  $\xi$ .

**Keywords:** cold rolled electrical steel, dynamic coefficient, eddy current loss, electromagnetic field, hysteresis, inter-sheet electrical conductivity, laminated core, magnetic anisotropy, nonlinearity, power transformers.

### **References**

- [1] S.D. Lizunov, "Results of the 1988 session of CIGRE. Manufacture of transformers", *Elektrichestvo*, vol. 8, pp. 37-45, Aug. 1989.
- [2] L.V. Leites, *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]*. Moscow: Energy, 1981 (in Russian).

- [3] V.A. Zaykova, I.E. Startseva and B.N. Filippov, *Domennaya struktura i magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley [Domain structure and magnetic properties of electrical steel]*. Moscow: Nauka, 1992 (in Russian).
- [4] E.V. Kalinin, “Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Part 1. Recommendations for determining the degree of magnetic anisotropy of cold-rolled electrical steels”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 2 (121), pp. 96-105, 2018.
- [5] E.V. Kalinin, “Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Part 2. Experimental substantiation of application at calculations of magnetic field of the vector magnetization characteristics of cold-rolled electrical steels”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (122), pp. 71-80, 2018.
- [6] A.V. Ivanov-Smolensky and Yu.V. Abramkin, “Kriterial'naya ocenka elektromagnitnyh yavlenij v ferromagnitnoj plastine s pryamougol'nym ciklom [Criteria assessment of electromagnetic phenomena in a ferromagnetic plate with a rectangular cycle]”, *Elektrichestvo*, vol. 4, pp. 58-61, 1980 (in Russian).
- [7] V.A. Zakharov, E.I. Popov and L.P. Shaydyuk, “K raschetu processa dinamicheskogo peremagnichivaniya provodyashchego ferromagnitnogo lista [To the calculation of the process of dynamic magnetization reversal of a conductive ferromagnetic sheet]”, *Elektrichestvo*, vol. 11, pp. 64-66, 1984 (in Russian).
- [8] Yu.S. Cherkashin, “Process i energiya namagnichivaniya listovogo magnitoprovoda pri pryamougol'nom napryazhenii [The process and magnetization energy of a sheet magnetic circuit at a rectangular voltage]”, *Elektrichestvo*, vol. 6, pp. 60-64, 1978 (in Russian).
- [9] M.A. Coulson, R.R.S. Simpson, R.D. Slater and W.S. Wood, “Eddy current losses in steel taking into account the effect of hysteresis”, in proc. *International Symposium on electro-dynamics. Forces and losses in transformers*. Part 2, 1979, Lodz, Poland, pp. 229-242.
- [10] J. Lammeraner and M. Shtafel, *Vikhrevyye toki [Eddy Currents]*. Moscow: Energiya, 1967 (in Russian).
- [11] E.A. Boldyrev, M.Kh. Ziherman and N.P. Kamneva, “Peremennoe elektromagnitnoe pole v provodyashchem liste s nelinejnoy magnitnoj pronicaemost'yu [Alternating electromagnetic field in a conductive sheet with non-linear magnetic permeability]”, *Elektrichestvo*, vol. 3, pp. 61-66, 1974 (in Russian).
- [12] E.V. Kalinin and V.I. Lyubivyy, “Raschet poter' na vkhrevyye toki v massivnyh i shihtovannyh ferromagnitnyh serdechnikah [Calculation of eddy current losses in massive and laminated ferromagnetic cores]”, in proc. *Elektroprivod i avtomatizatsiya v mashinostroenii [Electric drive and automation in mechanical engineering]*. Moscow, 1980, pp. 138-143 (in Russian).
- [13] K.M. Polivanov, *Elektrodinamika veshchestvennyh sred [Electrodynamics of material media]*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [14] I.N. Bronstein and K.A. Semendyaev, *Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov [Math reference. For engineers and students of technical colleges]*. Moscow: Nauka, 1967 (in Russian).
- [15] E.V. Kalinin, “Normalizovannyj podhod k modelirovaniyu poter' na peremagnichivanie v listovoj elektrotekhnicheskoy stali [Normalized approach to modeling loss on remaking in sheet electrical steel]”, in proc. *Elektrooborudovanie promyshlennyh*

- ustanovok [Electrical Equipment for Industrial Installations]*. Gorky, USSR, 1986, pp. 159-164 (in Russian).
- [16] V.P. Glukhov and R.K. Schmidt, *Normalizatsiya harakteristik namagnichivaniya [Normalization of magnetization characteristics]*. Riga: Zinatne, 1974 (in Russian).
- [17] A.I. Dikan' and E.V. Kalinin, "Ocenka tochnosti rascheta ferromagnitnykh ustrojstv na osnove differentsial'nykh uravnenij namagnichivaniya [Evaluation of the accuracy of calculation of ferromagnetic devices based on differential equations of magnetization]", in proc. *Ventil'nye preobrazovateli s uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami [Enhanced Energy Valve Converters]*. Moscow, 1977, pp. 49-50 (in Russian).
- [18] Electrical steel. Methods of test for magnetic and electrical properties. Method for measurement of resistance ratio of insulating coating, GOST 12119.8-98, July 1999.
- [19] S.K. Godunov and V.S. Ryabenky, *Raznostnye skhemy [Difference schemes]*. Moscow: Nauka, 1977 (in Russian).
- [20] L.A. Potapov and V.V. Maklakov, "K voprosu ob izmenenii magnitnoj pronicaemosti v massivnom magnitoprovode [On the change in magnetic permeability in a massive magnetic circuit]", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika [Russian Electromechanics]*, vol. 4-5, pp. 9-13, 2001 (in Russian).
- [21] E.V. Kolesnikov, "Lokal'naya struktura i approksimatsiya polej (Ch. 3) [Local structure and approximation of fields (Part 3)]", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika [Russian Electromechanics]*, vol. 1, pp. 3-13, 2001 (in Russian).
- [22] T. Yagisawa, Y. Takekoshi and S. Wada, "Magnetic properties of laminated steel sheets for normal fluxes", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 26, pp. 340-342, 1982
- [23] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, "Sharp surface effect in joints of laminated cores of power transformers", *Smart Electrical Engineering*, vol. 4, pp. 52-67, Dec. 2019.

УДК 621.314.2

М.И. Петров

## РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВОЛЬТОДОБАВКОЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Рассматривается работа регулятора переменного напряжения (РПН) с синусоидальной вольтодобавкой. Предлагается подход к расчету коэффициентов трансформации трансформатора РПН с вольтодобавкой с учетом его применения в различных областях. Предлагаемый подход реализует заданную, соответствующую необходимым требованиям, регулировочную характеристику РП. Для расчета коэффициентов трансформации предлагается использовать математический пакет *Mathcad*.

**Ключевые слова:** вольтодобавка, коэффициент трансформации, регулирование напряжения, регулировочная характеристика, регулятор переменного напряжения, стабилизация напряжения.

### 1. Введение

В настоящее время требования регулирования уровня переменного напряжения наблюдается в различных областях промышленного и бытового сектора. В первую очередь, это обусловлено тем, что регулирование уровня напряжения позволяет оптимизировать ряд технологических процессов, повысить их энергоэффективность, увеличить срок службы исполнительных механизмов. Задачи регулирования напряжения актуальны в электрических сетях сельской местности, в дуговой сталелитейной плавке, при пуске асинхронных электродвигателей и т.д.

Одна из наиболее актуальных технологий для реализации данных задач основана на применении регуляторов переменного напряжения (РПН) с вольтодобавкой. Использование таких устройств позволяет обеспечивать требуемые уровни напряжения на нагрузке. Основным элементом РПН с вольтодобавкой является вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), одна из обмоток которого включается последовательно с источником питания и нагрузкой. Регулирование уровня напряжения вольтодобавки возможно реализовать за счет применения различных подходов, одним из которых является управление величиной коэффициента трансформации

ВДТ. Применение такого способа регулирования напряжения определяет основное преимущество РПН, построенных по такой технологии – синусоидальность напряжения на нагрузке.

Анализ существующей литературы указывает на отсутствие единого подхода к расчету коэффициентов трансформации ВДТ, ведущего к реализации требуемой регулировочной характеристике РПН. В целом наличие такого подхода способствует проведению требуемых технологических процессов в различных областях применения РПН. В статье показано, что в зависимости от требуемой функциональной особенности РПН метод расчета коэффициентов трансформации вольтодобавочного напряжения будет различен.

Целью статьи является анализ подходов к реализации регулируемого коэффициента трансформации трансформатора РПН с синусоидальной вольтодобавкой. Достижение данной цели обеспечивается за счет исследования подходов, ведущих к реализации управления коэффициентом трансформации, разработки методики расчета параметров трансформатора для обеспечения заданного шага регулирования в различных областях применения РПН, анализа влияния параметров трансформатора на регулировочную характеристику РПН.

## **II. Применение регуляторов переменного напряжения с вольтодобавкой для управления уровнем напряжения на нагрузке**

Основным блоком РПН с вольтодобавкой (рис. 1), который обеспечивает изменение уровня напряжения на нагрузке, является трансформатор с регулируемым коэффициентом трансформации [1].

Одним из подходов, ведущих к реализации регулируемого трансформатора (РТ), является применение трансформатора, одна из обмоток которого секционирована [2]. Регулирование коэффициента трансформации достигается за счет включения различных комбинаций последовательного соединения секций секционированной относительно друг друга. При этом каждая секция секционированной обмотки трансформатора в данном последовательном соединении может быть включена согласно или встречно относительно другой секции или может быть вообще не включена в соединение. Для переключения секций секционированной обмотки в различные состояния применяют коммутатор, управление которым обеспечивает реализацию различных комбинаций последовательного включения секций [3].

Основные соотношения, описывающие работу РПН:

$$U_n = U_c \pm U_{вд} \quad (1)$$

$$U_{вд} = U_{ш} / K_{тр} \quad (2)$$

где  $K_{тр}$  – коэффициент трансформации РТ;  $U_c$  – входное напряжение РПН;  $U_{ш}$  – напряжение на входе РТ (на рис. 1 это входное напряжение РПН);  $U_{вд}$  – напряжение на выходе РТ (напряжение вольтодобавки).

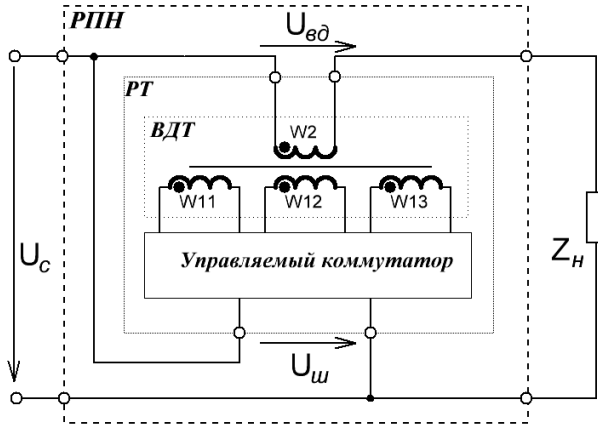


Рис. 1. Регулятор переменного напряжения с вольтодобавкой:

РПН – регулятор переменного напряжения с вольтодобавкой,  
 РТ – регулируемый трансформатор, ВДТ – вольтодобавочный трансформатор,  
 Управляемый коммутатор – набор управляемых ключей, соединенных  
 между собой и с ВДТ определенным образом;  $W_2$  – серийная обмотка ВДТ;  
 $W_{1i}$  – шунтовая обмотка ВДТ, с секциями  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{13}$ ;  
 $Z_H$  – сопротивление нагрузке РПН

### III. Управление коэффициентом трансформации РТ

Коэффициент трансформации секции обмотки с номером  $i$ :

$$K_{три} = W_{1i} / W_2 \quad (3)$$

где  $W_{1i}$  – число витков  $i$ -ой секции шунтовой обмотки;  $W_2$  – число витков серийной обмотки.

Характер включения  $i$ -ой секции шунтовой обмотки трансформатора в последовательном соединении секций можно задать функцией:

$$f_i = \{0; -1; 1\} \quad (4)$$

где «0» –  $i$ -я секция обмотки не включена в соединение; «-1» –  $i$ -я секция обмотки трансформатора включена согласно с другой обмоткой трансформатора; «1» –  $i$ -я секция обмотки включена встречно с другой обмоткой трансформатора.

Коэффициент трансформации РТ при различном включении секций обмотки:

$$K_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot K_{\text{тp}i} \quad (5)$$

где  $n$  – количество секций шунтовой обмотки.

Знак результата выражения (5) показывает знак вольтодобавочного напряжения.

Наличие трех различных вариантов подключения секции обмотки в последовательном соединении показывает, что для  $n$  секций обмотки количество возможных комбинаций включения секций и, следовательно, возможных значений коэффициента трансформации РТ составляет  $3^n$ .

Регулирование уровня напряжения при использовании трансформатора с секционированной обмоткой происходит ступенчато. Одним из основных показателей при таком способе регулирования является возможность обеспечения равномерного распределения уровней вольтодобавочного напряжения. Это достигается соответствующим расчетом коэффициентов трансформации каждой секции секционированной обмотки [4].

Для расчета коэффициентов трансформации секций обмотки приемлем допущение, по которому сумма отклонений вольтодобавочного напряжения, полученного для рассчитываемых коэффициентов трансформации, от идеального распределения вольтодобавочного напряжения с равным шагом регулирования минимальна. Под идеальным распределением понимается такое распределение, при котором при заданном количестве различных комбинаций последовательного соединения секций секционированной обмотки шаг регулирования вольтодобавочного напряжения имел бы одно значение. Однако, ввиду частого участия в формировании вольтодобавочного напряжения одних и тех же секций секционированной обмотки, идеального распределения добиться нельзя.

Решение задачи расчета коэффициентов трансформации секций секционированной обмотки можно получить при использовании математического пакета *Mathcad*. Блок *Given – Minerr* позволяет найти приближенное решение алгебраических уравнений [5]. Система решения алгебраических уравнений на основе блока *Given – Minerr*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Given} \\ K_{\text{тp}i} = U_{\text{ш}} / D \cdot i; \\ K_{\text{тp}(i+1)} = U_{\text{ш}} / D \cdot (i+1); \\ K_{\text{тp}(3^n)} = U_{\text{ш}} / D \cdot 3^n; \\ \text{Minerr}(K_{\text{тp}}), \end{array} \right. \quad (6)$$



где  $U_{ш}$  – напряжение на входе РТ;  $D$  – шаг регулирования;  $i$  – номер комбинации;  $n$  – количество секций обмотки.

При расчете коэффициентов трансформации с использованием блока *Given – Minerr* требуется придерживаться следующей последовательности действий. Во-первых, необходимо указать начальные приближения коэффициентов трансформации секций обмотки и шаг регулирования напряжения. Во-вторых, следует в теле блока прописать комбинации включения секций обмотки, которые должны обеспечивать требуемое значение вольтодобавки. На основе начальных приближений нужно указать соответствие различных коэффициентов трансформации РТ с уровнями вольтодобавочного напряжения, так чтобы минимальному значению вольтодобавки соответствовало максимальное значение коэффициента трансформации РТ, а максимальному значению вольтодобавки – минимальное значение коэффициента трансформации. Разность вольтодобавочного напряжения соседних уровней должна соответствовать шагу регулирования. Количество уравнений, указанных в блоке, соответствует количеству возможных комбинаций включения обмоток.

Для поиска коэффициентов трансформации секций секционированной обмотки в теле блока *Given – Minerr* необходимо указать комбинации, при которых коэффициент трансформации трансформатора принимает либо положительные значения, либо отрицательные значения, в противном случае результат расчета будет неверен.

#### IV. Результаты

На рис. 2 показано идеальное и рассчитанное распределение уровней вольтодобавочного напряжения для всех комбинаций включения секций обмотки. Рассчитанное распределение получено для следующих параметров: количество секций обмотки – 3, напряжение на обмотке – 220 В, требуемый шаг регулирования – 3 В, диапазон регулирования – 0-39 В. Получено: коэффициенты трансформации секций –  $K_{тр1} = 5,035$ ,  $K_{тр2} = 10,12$ ,  $K_{тр3} = 21,89$ , максимальный и минимальный шаг регулирования – 17 В, 0,016 В, диапазон регулирования – 0-43,7 В.

На рис. 2 показано распределение только для положительного знака вольтодобавки, для отрицательного оно будет идентичное, но с другим знаком. Как видно, отклонение рассчитанного распределения вольтодобавочного напряжения от идеального распределения существенное, максимальный шаг между уровнями более чем в 5 раз больше шага регулирования, а минимальный шаг между уровнями меньше шага регулирования в 187 раз. Наличие трех секций обмотки показывает, что одна секция обмотки участвует в формировании 18 различных комбинациях включения, то есть в 18 различных  $K_{тр}$ .

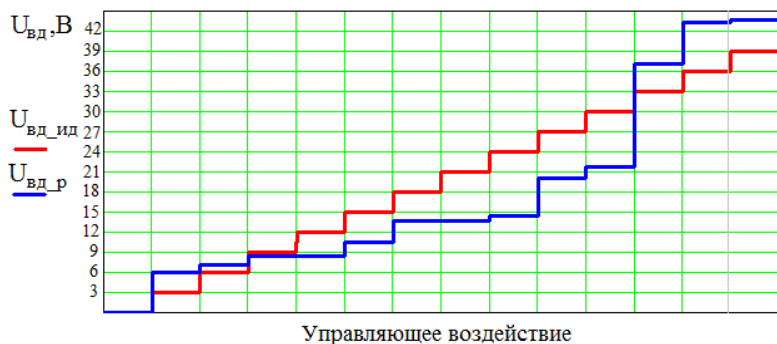


Рис. 2. Идеальное ( $U_{вд\_ид}$ ) и рассчитанное ( $U_{вд\_р}$ ) распределение уровней вольтодобавочного напряжения всех комбинаций трех секций обмотки

Поэтому блок *Given – Minerr*, учитывая все комбинации включения секций обмотки для обеспечения минимальной суммы отклонения от идеального распределения, выдает результат, при котором появляется существенная разница между минимальным и максимальным шагом регулирования. Одним из способов, способствующих уменьшению этой разницы, является снижение вовлеченности секции обмотки в формировании различных комбинаций включения секций. Это можно решить, например, исключением таких комбинаций, в которых присутствует встречное и согласное включение секций. Число комбинаций, удовлетворяющих этим требованиям, составляет  $2^{n+1}-1$ , а число комбинаций в которых участвует одна секция обмотки равно  $2^n$ , что примерно составляет 50 % от общего числа комбинаций, поэтому в этом случае вовлеченность секции на 33 % меньше относительно вовлеченности секции при распределении всех возможных комбинаций.

Уменьшение числа комбинаций включения секций обмоток с сохранением диапазона регулирования увеличивает шаг регулирования, что необходимо учитывать при расчете системы (6).

На рис. 3 показано рассчитанное и идеальное распределение уровней вольтодобавочного напряжения для однотипного включения секций обмотки и для всех комбинаций включения секций обмотки соответственно. Рассчитанное распределение получено для следующих параметров: количество секций обмотки – 3, напряжение на обмотке – 220 В, шаг регулирования – 5,57 В, диапазон регулирования – 0-39 В. Получено: коэффициенты трансформации секций –  $K_{тр1} = 5,55$ ,  $K_{тр2} = 6,58$ ,  $K_{тр3} = 8,39$ , максимальный и минимальный шаг регулирования – 10,72 В, 6,2 В, диапазон регулирования – 0-39,6 В.

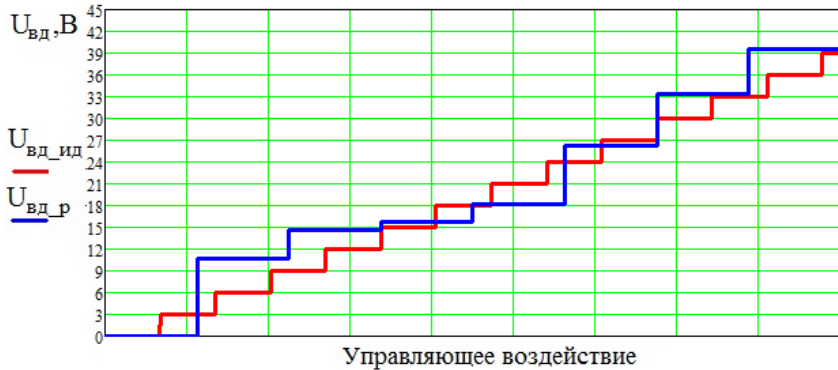


Рис. 3. Распределение уровней вольтодобавочного напряжения для трех секций обмотки при однотипном включении секций обмотки ( $U_{вд\_р}$ ) и идеальное распределение для всех комбинаций включения секций ( $U_{вд\_ид}$ )

На рис. 3 показано только распределение для положительного знака вольтодобавки, для отрицательного оно будет идентичное, но с другим знаком. Видно, что отклонение рассчитанного распределения вольтодобавочного напряжения от идеального распределения снизилось, относительного распределения, учитывающего все комбинации включения секций. Кроме того, диапазон регулирования, обеспечиваемый полученными коэффициентами трансформации секций, приблизился к идеальному. Максимальный шаг и минимальный шаг регулирования между уровнями соответственно в 3,5 и 2,07 раза больше шага регулирования для идеального распределения, который составляет 3 В.

Как видно, распределение уровней вольтодобавочного напряжения путем исключения различных комбинаций включения секций обмоток из формирования вольтодобавочного напряжения становится равномернее относительно распределения с учетом всех комбинаций включения секций обмоток, но это достигается за счет уменьшения количества различных уровней регулирования. Поэтому использование такого способа актуально в областях, где равномерность шага регулирования основное требование.

### V. Обсуждение результатов

В функции РПН помимо задач регулирования напряжения входят задачи обеспечения стабилизированного уровня напряжения на нагрузке [4]. Представленный выше подход к расчету коэффициентов трансформации секций обмотки возможно применить только для решения задач регулирования, так как в нем не учитывается изменение уровня входного напряжения РПН. Для расчета коэффициентов трансформации секций об-

мотки для РПН с функцией стабилизации выходного напряжения уравнения системы (6) необходимо изменить.

Так, для регуляторов переменного напряжения, повышающих напряжение на нагрузке:

$$K_{\text{три}} = U_{\text{н.ном}} + D \cdot i / D \cdot i, \quad (7)$$

где  $U_{\text{н.ном}}$  – требуемый уровень напряжение на нагрузке при колебаниях входного напряжения РПН

Для регуляторов переменного напряжения, понижающих напряжение на нагрузке:

$$K_{\text{три}} = U_{\text{н.ном}} - D \cdot i / D \cdot i, \quad (8)$$

Таким образом, использование трансформатора с секционированными обмотками решают задачи регулирования напряжения и применение малого количества секций обмоток обеспечивает большое количество уровней регулирования.

## VI. Заключение

Предложен подход к расчету параметров ВДТ для обеспечения заданного шага регулирования напряжения вольтодобавки и заданного распределения уровней вольтодобавочного напряжения при использовании различных функциональных особенностей РПН с вольтодобавкой.

© Петров М.И., 2020

## Библиографический список

- [1] Panfilov D.I., Petrov M.I., Astashev M.G. Analysis of voltage regulators with boost voltage // 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 11-14, 2019, Genova, Italy. Pp. 1-6.
- [2] Thompson R. A thyristor alternating-voltage regulator // IEEE Transactions on Industry and General Applications. 1968. № IGA-4 (2). С. 162-168.
- [3] Миловзоров В.П., Мусолин Л.К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
- [4] Петров М.И., Рашитов П.А., Панфилов Д.И. Расчет коэффициентов трансформации тиристорного регулятора переменного напряжения для различных областей его применения // Четырнадцатая всерос. (межд.) науч.-техн. конф. «Электроэнергетика. Энергия-2019», Апрель 2-4, 2019, Иваново, Россия. Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 3. С. 30.
- [5] Амосова О.А., Вестфальский А.Е. Применение пакета Mathcad к решению вычислительных задач. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 30 с.

**M.I. Petrov**

**REGULATION OF TRANSFORMATION RATIO  
OF TRANSFORMER OF AC VOLTAGE REGULATOR  
WITH SINUSOIDAL BOOST VOLTAGE**

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russia

**Abstract.** The operation of an AC voltage regulator with a sinusoidal boost voltage is considered. An approach to calculate the transformation ratio of AC voltage regulator transformer is proposed. The proposed approach is lead to calculate necessary regulation characteristic. The Mathcad is proposed as a tool for calculating transformation ratios.

**Keywords:** AC voltage regulator, boost voltage, regulation characteristic, transformation ratio, voltage regulation, voltage stabilization.

**References**

- [1] D.I. Panfilov, M.I. Petrov and M.G. Astashev, “Analysis of voltage regulators with boost voltage”, in proc. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, June 11-14, 2019, Genova, Italy, pp. 1-6.
- [2] R. Thompson, “A thyristor alternating-voltage regulator”, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol. IGA-4, is. 2, pp.162-168, March 1968.
- [3] V.P. Milovzorov and L.K. Musolin, *Diskretnye stabilizatory i formirovateli napryazheniya [Discrete stabilizers and voltage shapers]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian)
- [4] M.I. Petrov, P.A. Rashitov and D.I. Panfilov, “Calculation of transformation coefficients of a thyristor AC voltage regulator for various fields of its application”, in proc. *Fourteenth All-Russian (international) scientific and technical conference «Elektroenergetika. Energiya-2019 [Power industry. Energy 2019]»*, Apr. 2-4, 2019, Ivanovo, Russia. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2019, vol. 3, pp. 30 (in Russian).
- [5] O.A. Amosova and A.E. Westphal'skiy, *Primenenie paketa Mathcad k resheniyu vychislitel'nyh zadach [Application of the Mathcad package to solving computational problems]*. Moscow: Publishing House MPEI, 2007 (in Russian).

УДК 621.3.07

Г.В. Федоров<sup>1</sup>, А.С. Плехов<sup>1,2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

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

<sup>2</sup>ООО «Энергосбережение»

Приводится описание современных тенденций в области проектирования систем управления электротехническими комплексами. Рассмотрена возможность применения модельно-ориентированного подхода при проектировании цифровых регуляторов систем управления электротехническими объектами. Дано описание процесса разработки с использованием модельно-ориентированного подхода на примере проектирования цифрового регулятора, который является элементом системы электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием параметров. Приведено описание основных этапов работы в программной среде *Matlab/Simulink*.

**Ключевые слова:** модельно-ориентированное проектирование, программно-аппаратное моделирование, системы автоматического управления, регуляторы, электропривод, *Matlab/Simulink*, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

### 1. Введение

Проектирование систем управления электроприводами и другими электротехническими комплексами включает следующие этапы:

- построение модели объекта управления;
- анализ и построение регулятора;
- моделирование работы объекта и системы управления;
- реализация системы управления на целевой аппаратной платформе.

На современном этапе научно-технического прогресса использование традиционной методологии при разработке многоуровневых систем управления сложными электротехническими комплексами сопряжено с рядом трудностей: отсутствие единой среды разработки, поддерживающей все этапы проектирования устройства; дорогостоящий процесс верификации и тестирования как готового изделия, так и его отдельных модулей, ввиду использования физических моделей и т.д. С учетом подобных об-

стоятельств использование модельно-ориентированного подхода (МОП) является перспективным направлением среди возможных методов проектирования [1, 2].

Подобные задачи удобно решать в графической среде имитационного моделирования. К наиболее распространенным программам, предназначенным для их решения, относятся: *Labview*, *SimInTech*, *Matlab/Simulink*. Далее будет рассматриваться описанный подход на примере программного пакета *Matlab/Simulink* [3], поскольку он имеет в своем составе библиотеки с готовыми блоками для моделирования устройств различных инженерных областей. Выбор среды *Matlab/Simulink* обусловлен также ее популярностью среди инженеров разных специальностей и областей для решения собственных задач технических вычислений и моделирования.

Стандартная библиотека *Matlab/Simulink* под названием *HDL Coder* содержит в себе элементы, предназначенные для реализации на их основе модели проектируемого цифрового устройства, для которой впоследствии возможно сгенерировать платформо-независимый, унифицированный *HDL*-код для дальнейшего развертывания синтезированной схемы на целевой аппаратной платформе. В качестве таковой рассматривается программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) [4]. Логика работы данного класса устройств не определяется при изготовлении, а задается посредством программирования с использованием языков описания аппаратуры: *Verilog*, *VHDL* и др.

Тестирование и верификация *HDL*-кода для реализации пропорционально-интегрального-регулятора выполняются с использованием программно-аппаратного моделирования. Данный вид моделирования подразумевает взаимодействие аппаратной платформы с пространством программной модели, которая симулирует внешние воздействия на реальное устройство, соединенное с ЭВМ, на которой выполняется моделирование, через физическое подключение. Такой подход позволяет идентифицировать ошибки при прототипировании и верификации на более ранних этапах проектирования изделия.

Набор тестовых значений подается как на *Simulink*-модель, так и на тестируемый компонент – запрограммированную плату – через физический интерфейс, реакция устройства на тестовый данные передается обратно в пространство *Simulink*-модели и сравнивается с результатами моделирования. При использовании подобной методики разработчику доступна интерактивная верификация, позволяющая управлять ходом процесса моделирования и выполнять дополнительный анализ сигналов. Становится доступным наглядное сравнение результатов. В настоящее время данный способ моделирования находит широкое применение в разработке и испытании встраиваемых систем, к которым также относятся цифровые

системы автоматического управления для электроприводов. Он позволяет во многом сократить количество ресурсов, затрачиваемых на разработку устройства.

## II. Построение модели контура системы управления с последующей генерацией HDL-кода для выполнения верификации

В результате анализа литературных источников по рассматриваемой теме было выявлено отсутствие базовых примеров и наличие недосказанности в отношении описания маршрута проектирования цифровых систем по технологии МОП. Данный аспект носит негативный характер, поскольку разработчик, впервые ознакомившийся с данной технологией, зачастую не имеет возможности закрепить полученные знания, повторив эксперимент.

Рассмотрено использование описанного подхода при верификации HDL-кода для создания цифрового фильтра – регулятора, который находит активное применение при настройке внутреннего контура регулирования тока на модульный оптимум в системах электроприводов постоянного тока с подчиненным регулированием параметров [5]. Контур регулирования представлен на рис. 1.

Рассматриваемый внутренний контур образуется регулятором тока, силовым преобразователем, объектом регулирования и обратной связью по току через датчик тока.

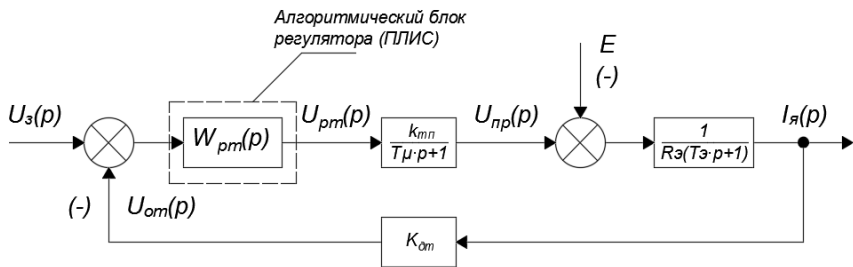


Рис.1. Структурная схема контура тока

При расчете регулятора тока контур настраивается на модульный оптимум, при этом влиянием ЭДС пренебрегают. В качестве регулятора тока в системе подчиненного регулирования электропривода постоянного тока следует применять пропорционально-интегральный регулятор. В качестве аппаратной платформы выступает отладочная плата на базе *Altera Cyclone IV EP4CE22F17C6N FPGA*. Использование программного обеспечения *Matlab/Simulink* [6] для генерации HDL-кода сопряжено с некоторыми ограничениями, накладываемыми на создаваемую разработчиком мо-



дель. Основным требованием является выполнение дискретизации синтезированной модели объекта и регуляторов, необходимость которой вызвана дискретным выполнением алгоритма регулирования на аппаратной платформе.

Необходимо иметь установленную среду разработки *Quartus II* для ПЛИС фирмы *Altera*, а также иметь установленные драйвера для работы интерфейса *JTAG*, через который осуществляется программирование ПЛИС в процессе тестирования. На рис. 2 представлена разработанная в среде *Matlab/Simulink* модель внутреннего контура регулирования тока, настроенная для генерации *HDL*-кода.

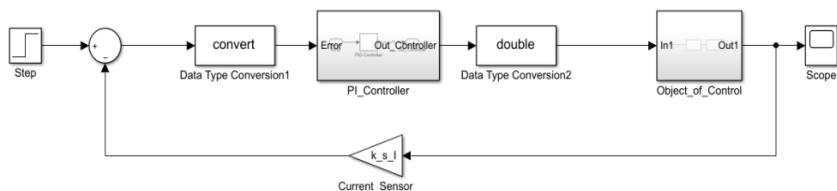


Рис. 2. *Simulink*-модель контура тока.

Подсистема *PI\_Controller* содержит в себе блок *Discrete PID Controller*. Настраиваемые параметры блока *PID Controller* включают в себя: тип контроллера (*PID*, *PI*, *PD*, *P* или *I*), структуру контроллера (параллельную или идеальную), временную область (непрерывную или дискретную), ограничение выходного сигнала на заданном уровне и т.д. Регулятор настроен на использование арифметики с фиксированной точкой. Подсистема *Plant* содержит в себе передаточную функцию объекта, которая включает в себя одну большую постоянную времени и одну малую, а также суммарный коэффициент усиления контура тока и представляет собой последовательное соединение двух апериодических звеньев первого порядка [5]. При составлении передаточной функции объекта были использованы стандартные блоки *Simulink* для составления непрерывной модели – *Transfer Fun*, которые впоследствии были дискретизированы с использованием инструмента *Simulink Model Discretizer* методом экстраполяции нулевого порядка, частота дискретизации составляет 20 МГц.

Блоки *Data Type Conversion* предназначены для согласования типов данных между моделью регулируемого объекта *Object\_of\_Control* и регулятора *PI\_Controller*. Цепь обратной связи содержит датчик тока, представленный пропорциональным звеном *Current\_Sensor*. Для проведения предварительной настройки модели использовалась команда *hdlsetup*. Для получения возможности использовать *HDL Coder* совместно со сторонним

инструментом разработки устройств на ПЛИС, был указан системный путь к этому инструменту с помощью команды *hdlsetuptoolpath* в окне выполнения команд *Matlab*. Далее осуществлена идентификация используемой отладочной платы с помощью команды *fpgaBoardManager*. Следующим этапом является генерация *HDL*-кода для подсистемы *PI\_Controller*. Для этого к подсистеме *PI\_Controller* была применена команда *Generate HDL for Subsystem*. После успешной генерации кода, выполнен запуск *FPGA-in-the-Loop (FIL) Wizard* [7] через команду *filWizard*.

*Simulink*-модель, предназначенная для верификации сгенерированного *HDL*-кода, представлена на рис. 3.

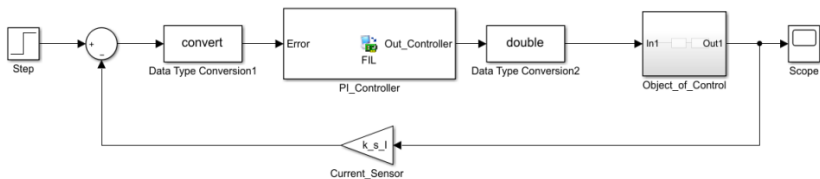


Рис. 3. *Simulink*-модель с импортированным *FIL*-блоком.

В процессе симуляции тестируемого *HDL*-кода на разработанной модели, получен график реакции системы на единичное ступенчатое воздействие. Таким же способом была протестирована исходная модель рис. 2. Результаты представлены на рис. 4. Высокое соответствие экспериментальных данных (ошибка менее 1 %) теоретическим может быть обусловлено высокой частотой тактирования отладочной платы, которая составляет 50 МГц, а также выбором большой разрядности данных для представления коэффициентов регулятора.

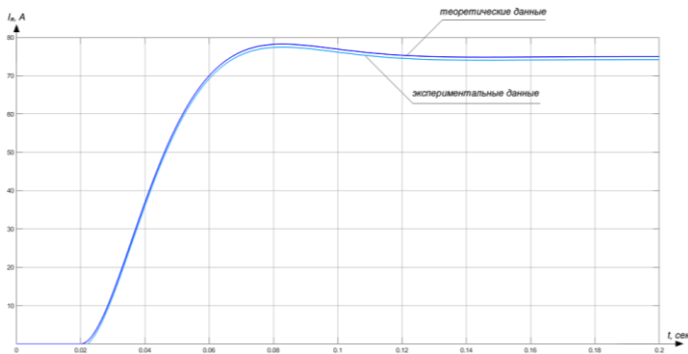


Рис. 4. Результат верификации *HDL*-кода с использованием *FIL*-блока

### III. Заключение

Применение модельно-ориентированного подхода и программно-аппаратного тестирования заметно ускоряет процесс разработки, а также обеспечивает дополнительную визуализацию результатов при проведении тестов, заметно сокращая тем самым время цикла разработки и процесс управления файлами, а именно – их хранение, систематизацию, передачу и координацию работы программистов при работе над большим проектом.

Использованные программные инструменты позволяют выполнять отладку алгоритмов управления электроприводов различного типа на потенциальной аппаратной платформе. В данной методике поведение объекта управления (электродвигателя) симулируется программно, в соответствии с применяемой моделью, что позволяет отказаться от физического моделирования. За счет этого сокращается расход ресурсов на процесс отладки и разработки системы, а в случае разработки систем управления высокоответственными объектами появляется возможность не подвергать их излишним перегрузкам в процессе отладки.

© Федоров Г.В., 2020

© Плехов А.С., 2020

### Библиографический список

- [1] Деменков Н.П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 11. С. 66-69.
- [2] FPGA in the Loop // The MathWorks, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/hdlverifier/fpga-in-the-loop.html> (дата обращения 20.11.2019).
- [3] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- [4] Poon J.J., Kinsy M.A., Pallo N.A., Devadas S., Celanovic I.L. Hardware-in-the-loop testing for electric vehicle drive applications // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Feb. 5-9, 2012, Orlando, FL, USA. Pp. 2576-2582.
- [5] Тихомиров В.А., Мельников В.Л., Соколов В.В. Теория и расчет систем электропривода с подчиненным регулированием параметров. Н. Новгород: НГТУ, 2018. – 107 с.
- [6] Грушвицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 608 с.
- [7] Matlab R2018b, версия 9.5.0.94 // The MathWorks, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения 09.12.2019).

G.V. Fedorov<sup>1</sup>, A.S. Plekhov<sup>1,2</sup>

## APPLICATION OF MODEL-ORIENTED APPROACH IN DESIGNING DIGITAL CONTROL SYSTEMS FOR ELECTROTECHNICAL OBJECTS

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> «Energoberezhenie» Co Ltd

Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** A description of current trends in the field of design of control systems for electrical complexes is given. The possibility of applying a model-oriented approach to the design of digital controllers for control systems of electrical objects. A description of the development process using a model-oriented approach is given on the example of designing a digital controller, which is an element of a direct current electric drive system with subordinate control of parameters. The description of the main stages of work in the software environment Matlab / Simulink.

**Key words:** model-oriented design, hardware-in-the-loop simulation, automatic control systems, controllers, electric drive, Matlab/Simulink, FPGA.

### References

- [1] N.P. Demenkov, “Model-based design of control systems”, *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, vol. 11, pp. 66-69, Nov. 2008.
- [2] FPGA in the Loop [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/hdlverifier/fpga-in-the-loop.html/> (Accessed: Nov. 20, 2019).
- [3] I.V. Chernyh, *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Piter, 2008 (in Russian).
- [4] J.J. Poon, M.A. Kinsy, N.A. Pallo, S. Devadas and I.L. Celanovic, “Hardware-in-the-loop testing for electric vehicle drive applications”, in proc. *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Feb. 5-9, 2012, Orlando, FL, USA, pp. 2576-2582.
- [5] V.A. Tihomirov, V.L. Mel'nikov, V.V. Sokolov, *Teoriya i raschet sistem elektroprivoda s podchinennym regulirovaniem parametrov [Theory and calculation of electric drive systems with subordinate control of parameters]*. N. Novgorod: NNSTU, 2018 (in Russian).
- [6] R.I. Grushvickij, A.H. Mursaev and E.P. Ugryumov, *Proektirovanie sistem na mikroskhemah programmiruemoj logiki [Designing systems on programmable logic chips]*. St. Petersburg: BHV – Peterbug, 2002. (in Russian).
- [7] Matlab R2018b, version 9.5.0.94. [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/> (Accessed: Dec. 9, 2019).

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

---

УДК 621.311.001.57

**И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов, Р.А. Уфа,  
А.Б. Аскарлов, В.Е. Рудник, А.В. Киевец**

### **РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВЭУ 4 ТИПА В РАМКАХ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) становятся неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС). Современные ВЭУ подключаются к ЭЭС через статические преобразователи напряжения (ВЭУ 3 и 4 типов), что неизбежно оказывает влияние на ЭЭС в аварийных режимах работы. Влияние оценивается на стадии проектирования путем математического моделирования, в котором достоверность и полнота модели определяет результат. Однако детальное математическое моделирование ЭЭС с ВЭУ, подключенных через статические преобразователи напряжения (СПН), является трудоемкой задачей для существующих программно-вычислительных и программно-аппаратных комплексов (ПВК и ПАК) для расчета режимов и процессов ЭЭС. Моделирование быстродействующих полупроводниковых ключей СПН требует малого шага расчета, что значительно расходует ресурсы вычислительных процессоров, а при моделировании ветроэлектростанций, состоящих из десятков ВЭУ, делает его неосуществимым. Кроме этого, функционирование ЭЭС с ВЭУ описывается системами дифференциальных уравнений высокого порядка и большой размерности, решение которых аналитически не представляется возможным. Неизбежно используется метод численного интегрирования, имеющий свои ограничения, в результате чего достоверность полученных результатов становится неудовлетворительной. Авторами предложена идея моделирования СПН ВЭУ на физическом уровне в рамках разработанного гибридного подхода в моделировании ВЭУ и ЭЭС с ВЭУ. Разработан специализированный гибридный процессор ВЭУ, предназначенный для работы в специальном моделирующем комплексе, проведены экспериментальные исследования.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, гибридное моделирование, статический преобразователь напряжения, физическая модель, электроэнергетическая система.

## 1. Введение

Мощные ветроэнергетические установки (ВЭУ) в составе ветроэлектростанций (ВЭС) становятся неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС) во многих странах. Среди разных конструкций и типов ВЭУ наиболее применимой для работы в составе ЭЭС является ВЭУ 4 типа: ветротурбина (ВТ) с синхронным генератором, возбуждаемым постоянными магнитами (СГПМ), присоединенные через преобразователь напряжения и трансформатор к узлу ЭЭС [1].

Преобразователь представляет собой подключенные друг к другу через цепь постоянного тока (ЦПТ) статические преобразователи напряжения (СПН): со стороны СГПМ (СПН выпрямителя) и со стороны сети (СПН инвертора). В составе ЦПТ применяются конденсаторные батареи (КБ), предназначенные для аккумуляции и передачи электрической мощности с требуемым уровнем напряжения для обеспечения функций регулирования активной и реактивной мощности (рис. 1).

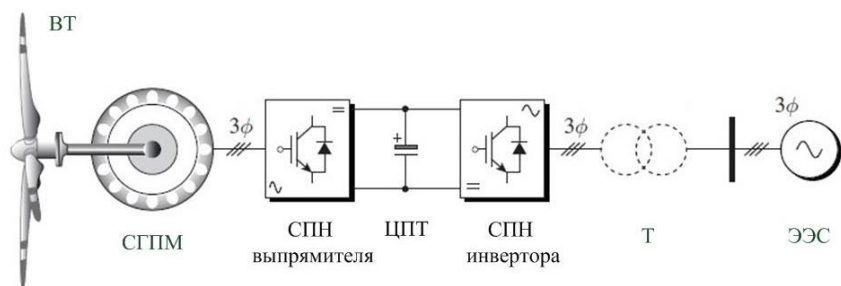


Рис. 1. Конфигурация ВЭУ 4 типа

Для решения задач проектирования и эксплуатации ЭЭС, в том числе – с ВЭУ и оценки влияния их взаимной работы, необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом, которую получают преимущественно путем математического моделирования. Применяемые для этого многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в ЭЭС (*Eurostag*, *PowerFactory*, *PSS/E*, *PSCAD/EMTDC* и др.) используют метод численного интегрирования. Поскольку совокупная математическая модель ЭЭС с ВЭУ неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений, достоверность такого моделирования ПВК оказывается неудовлетворительной [2-4] в силу ограничительных условий применимости теории методов численного интегрирования и накапливаемой методической ошибки интегрирования [5].

Помимо этого, расчеты в ПВК выполняются на персональных компьютерах, и вычислительные ресурсы процессора заняты, в том числе, другими программами и службами, вследствие чего моделирование даже небольших детальных трехфазных ЭЭС ограничивается вычислительной способностью процессора. При моделировании работы быстродействующих полупроводниковых ключей СПН ВЭУ требуются большие вычислительные ресурсы и моделирование с малым шагом интегрирования, что приводит к невозможности применения таких ПВК для детального моделирования ЭЭС с ВЭУ. Частично эту проблему решает применение многопроцессорных программно-управляемых комплексов (ПАК) реального времени (*RTDS*, *eMEGASIM*, *HYPERSIM*, и др.), которые делят вычислительные ресурсы между своими процессорами. Вместе с тем, все ПАК используют также метод численного интегрирования и имеют собственные ограничения, связанные со временем обмена информацией между процессорами, декомпозицией, статическим представлением сетевых элементов, применением метода симметричных составляющих и т.д. [6].

В ПВК и ПАК также не учитываются или учитываются упрощенно модели воспроизведения коммутационных процессов, в частности, функционирование силовых полупроводниковых ключей СПН, коммутации линейных выключателей и разнообразные короткие замыкания (КЗ) [7]. С применением современных быстродействующих устройств СПН актуализируется необходимость их детального моделирования, а для возможности достоверной оценки взаимного влияния ВЭУ на процессы и режимы в ЭЭС необходимо моделировать большие ЭЭС с ВЭУ. При эквивалентировании схем ЭЭС утрачивается влияние отдельных элементов или их небольших групп на режим ЭЭС [8], а динамика протекания процессов, особенно переходных, для больших и маленьких ЭЭС значительно различается [9].

В научно-исследовательской лаборатории моделирования электроэнергетических систем Томского политехнического университета создан всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), лишенный выше обозначенных проблем моделирования больших ЭЭС, наследуемых ПВК и ПАК [10-11]. Авторами разработан инструмент, представляющий собой специализированный гибридный процессор (СПП) ВЭУ 4 типа, предназначенный для работы в данном комплексе.

## **II. Идея и реализация гибридного подхода в моделировании ВЭУ и ЭЭС с ВЭУ**

Реализация гибридного подхода в моделировании ВЭУ 4 в ЭЭС представляет собой синтез цифровой, аналоговой и физической моделей, воспроизводящих то или иное оборудование ВЭУ 4 типа и моделируемую

ЭЭС. Синтез моделей происходит в разработанном СГП, представляющим собой многопроцессорные параллельные цифроаналоговые структуры, построенные на базе интегральных микросхем, операционных усилителей, цифроаналоговых управляемых ключей, микропроцессоров и других активных и пассивных элементов электроники (рис. 2).

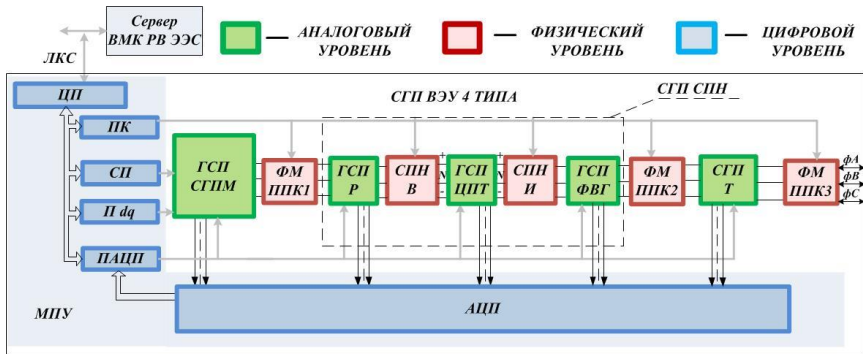


Рис. 2. Структурная схема СГП ВЭУ 4 типа:

ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор математической модели СГПМ, МПУ – микропроцессорный узел, обеспечивающий все информационно-управляющие функции СГП ВЭУ 4 типа и состоящий из периферийных микропроцессоров: СП – сопроцессор математической модели ветра, его аэродинамического преобразования и управления углом поворота лопастей ВТ, и реализующий алгоритмы релейной защиты и автоматики; ПК – процессор коммутации, обеспечивающий управление ЦУАК физических моделей; П  $dq$  – процессор  $d, q$ , обеспечивает координатное преобразование  $d, q \rightleftharpoons A, B, C$ ; ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования (АЦП), обеспечивает посредством АЦП оцифровку результатов моделирования, а также всевозможные функциональные преобразования информации; ЦП – центральный процессор, осуществляет информационно-управляющее взаимодействие по локальной компьютерной сети (ЛКС) между сервером ВМК РВ ЭЭС и периферийными процессорами, а также обеспечивает ввод данных в цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) ГСП и предварительную функциональную обработку результатов моделирования при необходимости; ГСП Р – гибридный сопроцессор реактора; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора присоединения.

Цифровой уровень обеспечивает реализацию алгоритмов управления путем применения цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации на основе современных интегральных устройств микроэлектроники и микропроцессоров. Для ВЭУ 4 типа в СГП на цифровом уровне обеспечивается реализация законов управления углом поворо-



та лопастей ВТ, реализация алгоритмов управления СПН и других информационно управляющих воздействий.

Аналоговый уровень представлен специализированными гибридными параллельными цифро-аналоговыми структурами, согласно синтезированным в них математических моделей оборудования ВЭУ (СГПМ, реактор, трансформатор, фильтр высших гармоник). В основе аналогового решения математических моделей, представленных системами дифференциальных уравнений, описывающих весь непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов – использование способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени;

Физический уровень означает реализацию в СГП коммутационных переключений, т.е., работу линейных выключателей, а также работу быстродействующих полупроводниковых ключей СПН ВЭУ 4 типа. Физическое моделирование обеспечивается применением цифрууправляемых физических моделей на базе интегральных униполярных цифрууправляемых аналоговых ключей (ЦУАК), позволяющих адекватно воспроизводить спектр всевозможных коммутационных процессов оборудования ВЭУ 4 типа.

Тем самым, при использовании гибридного подхода в моделировании исключаются проблемы, присущие существующим ПВК и ПАК:

- аналоговый уровень позволяет избежать декомпозицию процессов и режимов в ВЭУ и ЭЭС, использовать полные всережимные математические модели (также исключается неизвестная методическая ошибка численного интегрирования дифференциальных уравнений и ограничение интервала моделирования);
- физический уровень позволяет воспроизводить коммутационные процессы более детально и достоверно и не оказывать влияние на быстроту моделирования;
- цифровой уровень позволяет осуществлять работу алгоритмов управления, и не ограничивать информационно-управляющие функции и возможности.

### **III. Гибридная модель СПН**

В силу своих преимуществ конфигурация трехуровневого СПН с фиксированной нейтралью является наиболее применимой в ВЭУ 4 типа с СГПМ [12-13]. Физическая модель разработанного СПН (выпрямителя и инвертора) представлена на рис. 3.

В СПН быстродействующие полностью управляемые полупроводниковые  $i$ -ые ключи (транзисторы) реализованы согласно схеме замещения (рис. 4).

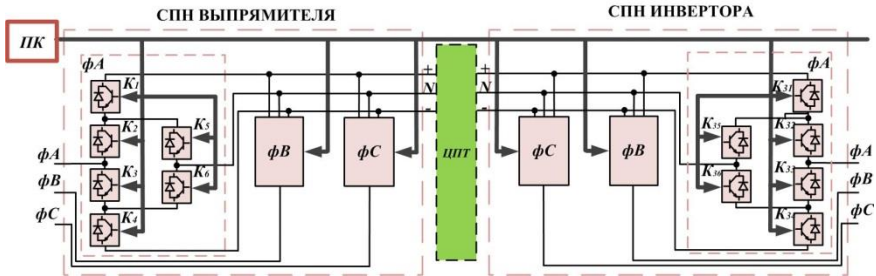


Рис. 3. Структурная схема цифруправляемой физической модели СПН:  
ПК – процессор коммутации, ЦПТ – цепь постоянного тока

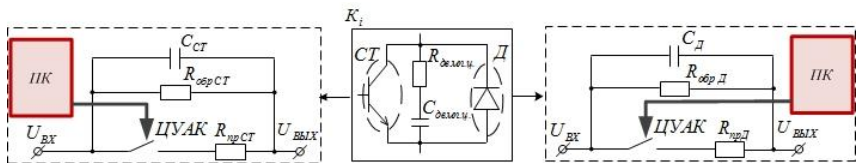


Рис. 4. Структурная схема цифруправляемой физической модели ППК

Униполярный ЦУАК моделирует  $i$ -ый силовой ключ, представляющий силовой управляемый транзистор и обратный диод с сопротивлением  $R_{\text{дем.п}}$  и емкостью  $C_{\text{дем.п}}$  защитного (демпферного) контура и параметрами их схем замещения. Поскольку униполярный ЦУАК является по отношению к реальным транзистору и диоду практически идеальным элементом, ЦУАК имитирующий обратный диод и ЦУАК имитирующий силовой транзистор дополняются прямыми  $R_{\text{пр.д}}$ ,  $R_{\text{пр.ст}}$  и обратными  $R_{\text{обр.д}}$ ,  $R_{\text{обр.ст}}$  сопротивлениями и емкостями  $C_{\text{ст}}$ ,  $C_{\text{д}}$  в соответствующем масштабе, воспроизводящими реальную емкость р-п перехода диода и емкость  $n$ -р- $n$  перехода транзистора в соответствии с их паспортными характеристиками. Таким образом, дополняющие сопротивления и емкость приближают коммутационный процесс переключения силовых полупроводниковых ключей к реальному.

При этом математическая модель системы автоматического управления (САУ) СПН выпрямителя обеспечивает работу в режиме максимальной мощности ВЭУ (*maximum power point tracking – MPPT*), формируя соответствующий сигнал для широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а также контролирует уровень заряда КБ и напряжение в нейтральной точке. А САУ СПН инвертора обеспечивает управление напряжением ЦПТ и реактивной мощностью, осуществляя также контроль

генерируемой ВЭУ активной мощности и трехфазного напряжения и его фазу в узле подключения, обеспечивая синхронизацию с ЭЭС [12-14].

#### IV. Экспериментальные исследования СГП ВЭУ 4 типа

Для подтверждения достоверности воспроизведения процессов в СГП ВЭУ 4 типа проведен комплекс экспериментальных исследований работы ВЭУ 4 типа при  $P_{\text{номВЭУ}} = 5 \text{ МВт}$  на нагрузку  $S_{\text{номН}} = 4 \text{ МВА}$  и ЭЭС (рис. 5).

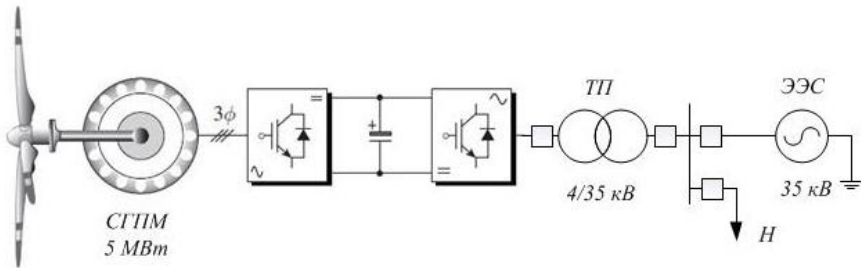


Рис. 5. Схема экспериментальных исследований ВЭУ 4 типа

Получены осциллограммы токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС, а также осциллограммы токов и напряжений на входе и выходе СПН, отражающие характер тока и напряжения на выходе СГПМ до выпрямления и характер тока и напряжения после преобразования инвертором в нормальном квазиустановившемся режиме (рис. 6 и 7).

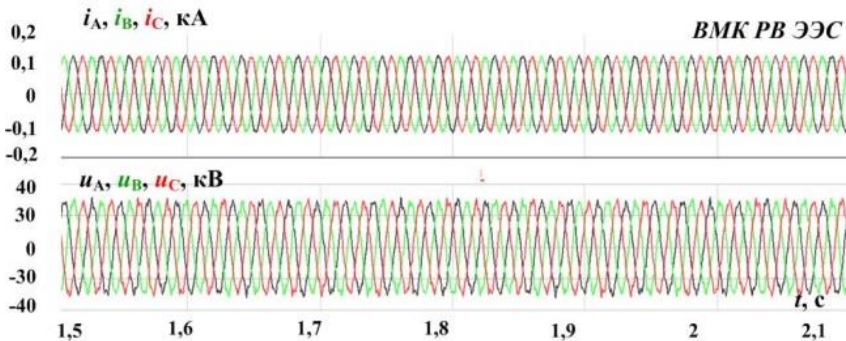


Рис. 6. Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ в ЭЭС

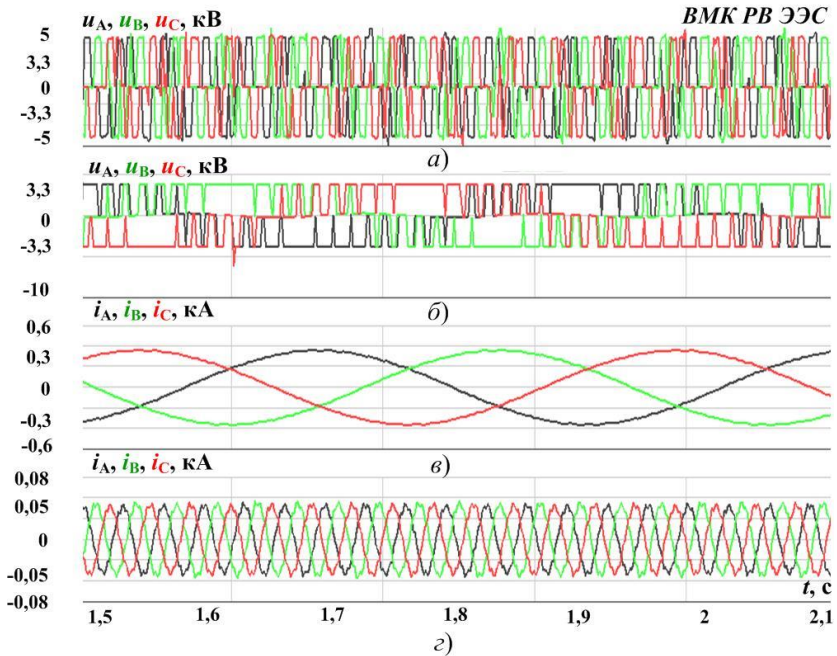


Рис. 7. Осциллограммы фазных токов и напряжений  
СПН выпрямителя и СПН инвертора:  
напряжение выходе инвертора (а); напряжение на выходе СГПМ (б);  
ток на выходе СГПМ (в); ток на выходе инвертора (г)

Осциллограммы фазных напряжений и токов иллюстрируют работу СПН, преобразующих ток и напряжение разных по частоте значений в ток и напряжение частотой  $f = 50$  Гц. Осциллограммы (рис. 9, а и г) сняты непосредственно на выходе инвертора и близки к синусоидальным с некоторой гармонической составляющей, обусловленной работой силовых полупроводниковых ключей.

Осциллограммы токов и напряжений, в узле подключения ВЭУ к ЭЭС, а также осциллограммы токов и напряжений на входе и выходе СПН инвертора в режиме однофазного КЗ представлены на рис. 8 и 9.

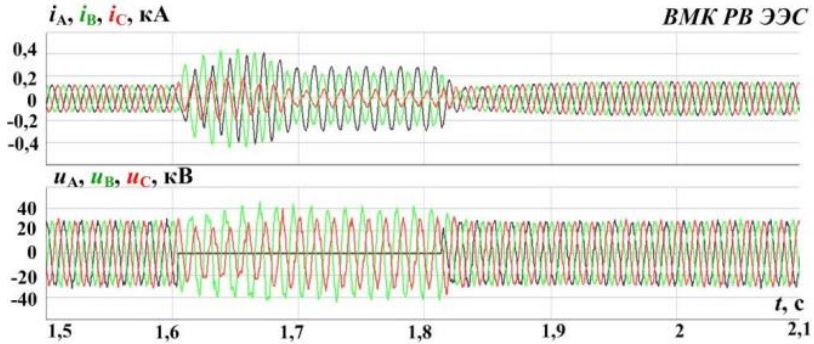


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС при однофазном КЗ

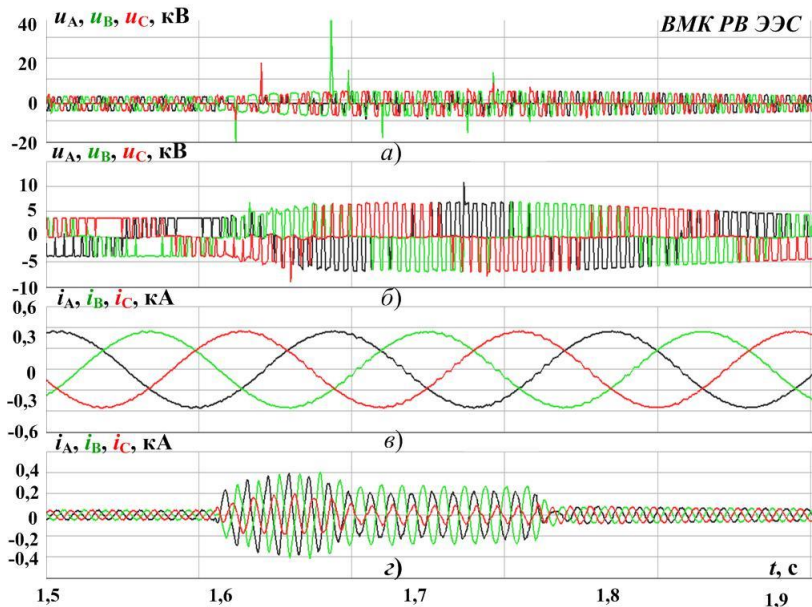


Рис. 9. Осциллограммы фазных токов и напряжений СПН выпрямителя и СПН инвертора при однофазном КЗ: напряжение на выходе инвертора (а); напряжение на выходе СПИМ (б); ток на выходе СПИМ (в); ток на выходе инвертора (г)

### У. Заключение

В соответствии с гибридным подходом разработана физическая модель СПН ВЭУ 4 типа, позволяющая воспроизводить весь непрерывный спектр нормальных и аномальных переходных процессов в ВЭУ 4 типа и ЭЭС с ВЭУ. Коммутационные процессы СПН моделируются на физическом уровне посредством ЦУАК. Проведены экспериментальные исследования разработанного образца. Осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования, соответствуют теоретическим. Гибридный подход в силу своих преимуществ может быть использован при моделировании ЭЭС с ВЭУ любой размерности, что является актуальным для современной электроэнергетики.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10006) «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации».*

© Разживин И.А., 2020

© Суворов А.А., 2020

© Уфа Р.А., 2020

© Рубан Н.Ю., 2020

© Аскаров А.Б. 2020

© Киевец А.В. 2020

© Рудник В.Е. 2020

### Библиографический список

- [1] Ackermann T. Wind power in power systems. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012. – 1049 p.
- [2] Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Высш. Школа, 2001. – 382 с.
- [3] Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008. – P. 31-40.
- [4] Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.П. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения // Известия Вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 92-95.
- [5] Хеминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1968. – 400 с.
- [6] Suvorov A., Gusev A., Ruban N., Andreev M., Askarov A., Ufa R., Razzhivin I., Kievets A., Bay J. Potential application of HRTSim for comprehensive simulation of large-scale power systems with distributed generation // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. № 20 (5). [Электронный ресурс]. URL:

- <https://www.degruyter.com/view/j/ijeeps.2019.20.issue-5/issue-files/ijeeps.2019.20.issue-5.xml> (дата обращения 29.02.2020).
- [7] Martinez-Velasco J.A. Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications. John Wiley & Sons Ltd., 2015. – 648 p.
- [8] Muljadi E., Zhang Y.C., Gevorgian V., Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sept. 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA. Pp. 1–5.
- [9] Carreras B.A., Newman D.E., Dobson I. Does size matter? // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2014. № 24 (2). [Электронный ресурс]. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4868393> (дата обращения 29.02.2020).
- [10] Andreev M., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bems J., Kralik T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. № 34 (2). Pp. 1404-1415.
- [11] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). С. 18-27.
- [12] Yaramasu V., Wu B. Model predictive control of wind energy conversion systems. Wiley-IEEE Press, 2016. – 512 p.
- [13] Yazdani A., Iravani R. A neutral-point clamped converter system for direct-drive variable-speed wind power unit // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. № 21 (2). Pp. 596-607.
- [14] Femia N., Granozio D., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. № 43 (3). Pp. 934-950.

**I.A. Razzhivin, N.Yu. Ruban, A.A. Suvorov, R.A. Ufa,  
A.B. Askarov, V.E. Rudnik, A.V. Kievets**

## **DEVELOPMENT OF PHYSICAL MODEL OF TYPE 4 WIND TURBINE STATIC VOLTAGE CONVERTER WITHIN HYBRID APPROACH**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russia

**Abstract.** The main driver in the development of renewable energy in most countries were the need for energy security, limited hydrocarbon and uranium resources, as well as the provisions of the Kyoto Protocol. Wind energy is developing most actively among all types of renewable energy sources. Wind turbines (WT) are becoming an integral part of electric power systems (EPS). Modern WT are connected to the EPS through static voltage converters (WT of 3 and 4 types), which inevitably affects the EPS in emergency operation. Influence is primarily evaluated at the design stage by mathemati-

cal modeling in which the reliability and completeness of the model determines the result. However, a detailed mathematical modeling of EPS with WT connected through static volt-age converters (SVC) is a laborious task for existing hardware and software simulation tools (HSS) for calculation the modes and processes of EPS. Modeling high-speed semiconductor switches of SVC requires a small calculation step, which significantly consumes the resources of computing processors, and when modeling wind farms consisting of several WT, it makes it not feasible. In addition, the EPS operation with WT is described by systems of differential equations of high order and large dimension, the solution of which is analytically impossible. The method of numerical integration, which has its limitations, is inevitably used, as a result of which the reliability of the results becomes unsatisfactory. The authors proposed the idea of modeling the SVC of WT at the physical level as part of the developed hybrid approach in modeling WT and EPS with WT. A specialized hybrid WT processor has been developed, designed to operate in a special modeling complex, and experimental studies have been carried out.

**Keywords:** electric power system, hybrid modeling, physical model, static volt-age converter, wind turbine.

### References

- [1] T. Ackermann, *Wind power in power systems*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012.
- [2] V.M. Verzhbitsky, *Chislennyye metody (matematicheskij analiz i obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya) [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]*. Moscow: Higher School, 2001 (in Russian).
- [3] J.C. Butcher, *Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, pp. 31-40.
- [4] A.S. Gusev, S.V. Svechkarov and I.P. Plodistiy, "Osnovnyye aspekty problemy modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem, perspektivy i sredstva ih resheniya [The main aspects of the problem of modeling electric power systems, prospects and means of solving them]", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, no. 3, pp. 92-95, 2006 (in Russian).
- [5] R.W. Hamming, *Numerical methods for scientists and engineers*. New York, San Francisco, Toronto, London: Mc Graw-Hill Book Company, 1962.
- [6] A. Suvorov, A. Gusev, N. Ruban, M. Andreev, A. Askarov, R. Ufa, I. Razzhivin, A. Kievets and J. Bay, "Potential application of HRTSim for comprehensive simulation of large-scale power systems with distributed generation", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 20, is. 5, 2019. [Abstract]. Available at: <https://www.degruyter.com/view/j/ijeeps.2019.20.issue-5/issue-files/ijeeps.2019.20.issue-5.xml>.
- [7] J.A. Martinez-Velasco. *Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2015.
- [8] E. Muljadi, Y.C. Zhang, V. Gevorgian and D. Kosterev, "Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant", in proc. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sept. 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA, pp. 1-5.



- 
- [9] B.A. Carreras, D.E. Newman and I. Dobson, “Does size matter?”, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. vol. 24, is. 2, 2014. [Online]. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4868393>.
- [10] M. Andreev, A. Gusev, N. Ruban, A. Suvorov, R. Ufa, A. Askarov, J. Bems and T. Kralik, “Hybrid real-time simulator of large-scale power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, is. 2, pp. 1404-1415, March 2019.
- [11] M.V. Andreyev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, “Concept and basic structure of the all-mode modeling complex”, *Gas industry*, no. 5 (752), pp. 18-27, 2017.
- [12] V. Yaramasu and B. Wu, *Model predictive control of wind energy conversion systems*. Wiley-IEEE Press, 2016.
- [13] A. Yazdani and R. Iravani, “A neutral-point clamped converter system for direct-drive variable-speed wind power unit”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, is. 2, pp. 596-607, June 2006.
- [14] N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, “Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, is. 3, pp. 934-950, July 2007.

УДК 621.314

**В.Ф. Стрелков, А.Б. Дарьенков, В.В. Ваняев****КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ  
С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан квазирезонансный преобразователь (КРП) напряжения с переключением при нулевом токе, преимуществами которого является естественное ограничение тока нагрузки и широкий диапазон регулирования и низкий уровень пульсаций выходного напряжения. Регулирование выходного напряжения осуществляется за счет рекуперации избытка энергии введением транзистора, шунтирующего первичную обмотку трансформатора. Описан принцип действия и рассмотрены режимы работы рассматриваемого КРП. С использованием математического и компьютерного моделирования проведены исследования внешних и регулировочных характеристик КРП для различных режимов его работы, что позволило определить рациональные параметры компонентов преобразователя. Результаты исследований легли в основу изготовления экспериментального образца КРП для блока системы импульсного питания емкостного накопителя. Испытания экспериментального образца показали перспективность применения предложенного КРП в автономных системах электроснабжения.

**Ключевые слова:** зарядное устройство, импульсный источник питания, квазирезонансный преобразователь, переключение при нулевом токе, регулирование напряжения, шунтирующий транзистор.

**1. Введение**

Квазирезонансные преобразователи (КРП) широко применяются в системах питания различных электротехнических комплексов. Их основное назначение – питание нагрузки стабилизированным напряжением.

КРП представляют собой резонансные преобразователи с квазипрямоугольными импульсами. Они используют резонансный L-C контур для «мягкого» переключения полупроводниковых ключей при нулевом токе [1] или напряжении. По сравнению с импульсными и резонансными преобразователями, КРП обладают меньшими габаритами, пониженным уровнем электромагнитных помех и большим КПД, за счет малых потерь при переключениях [2]. Благодаря этому, они нашли применение в автономных системах генерирования на основе возобновляемых источников энергии, электрических транспортных средствах, устройствах заряда емкостных накопителей [3, 4].

Для эффективной работы КРП с переменной нагрузкой (устройства заряда накопителей энергии, спутниковые системы) необходим широкий диапазон регулирования выходного напряжения КРП (от 0 до 100 %).

Рекуперация энергии с выхода преобразователя на его вход является перспективным подходом для регулирования выходного напряжения. Авторами предлагается КРП с широким диапазоном регулирования выходного напряжения. Он относится к КРП с переключением при нулевом токе. Выходное напряжение регулируется с помощью рекуперации избытка энергии с выхода преобразователя на вход схемы. Это достигается за счет установки регулирующего транзистора, шунтирующего первичную обмотку высоковольтного трансформатора.

Предложенное решение позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения КРП в пределах от 0 до 100 % номинального значения, ограничить токи нагрузки, снизить уровень пульсаций выходного напряжения, минимизировать массогабаритные параметры трансформатора и выходного фильтра.

## II. Принцип действия и режимы работы КРП

Принципиальная схема предложенного КРП [5, 6] представлена на рис. 1.

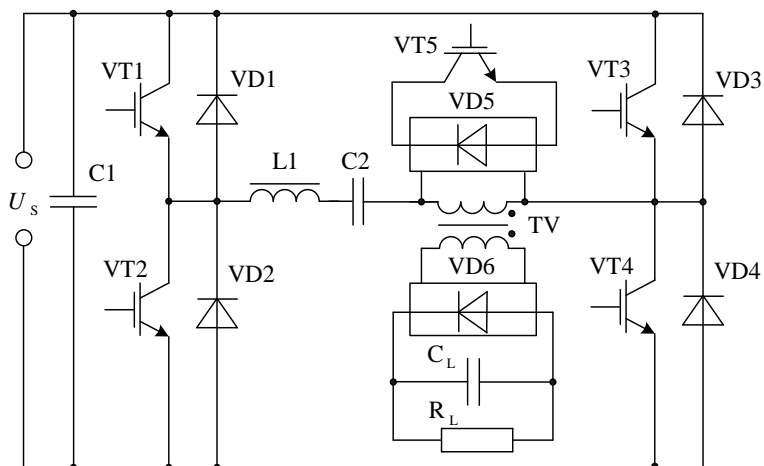


Рис. 1. Принципиальная схема КРП:

VT1-VT4 – транзисторы инвертора, VT5 – регулирующий (шунтирующий) транзистор, VD1-VD4 – шунтирующие диоды, VD5, VD6 – выпрямительные мосты,  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания, C1 – конденсатор входного фильтра, L1, C2 – дроссель и конденсатор резонансного контура (РК), TV – трансформатор; Cн – емкостный накопитель (ЕН);  $R_L$  – сопротивление нагрузки

В отличие от существующих КРП, в схеме на рис. 1 введены диодный мост  $VD6$  и регулирующий транзистор  $VT5$ . Назначение  $VT5$  – шунтирование первичной обмотки трансформатора  $TV$ , для рекуперации энергии обратно в сеть (в конденсатор  $C1$ ). На рис. 1 изображен преобразователь, выполненный по мостовой схеме, однако он может быть построен и на полумостовой схеме.

Рассмотрим принцип работы предложенного преобразователя.

При работе КРП происходит циклическое переключение транзисторов  $VT1$ - $VT5$  и смена их интервалов проводимости. Таким образом, в каждом полупериоде работы преобразователя можно выделить интервалы проводимости ключей, порядок и наличие которых может различаться, в зависимости от режима работы КРП (момента включения транзисторов:  $VT1$ - $VT5$ ). Интервалы проводимости для всех режимов работы КРП представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Режимы работы КРП

Режим	Интервал	Состояние ключей			Направление передачи энергии
		$VT1, VT4$ ( $VT2, VT3$ )	$VD1, VD4$ ( $VD2, VD3$ )	$VT5$	
1	1 ( $t_1..t_2$ )	+	-	-	нагрузка
	2 ( $t_2..t_3$ )	-	+	-	нагрузка
	3 ( $t_3..t_4$ )	Интервал бестоковой паузы			
2	1 ( $t_1..t_2$ )	+	-	-	нагрузка
	2 ( $t_2..t_3$ )	+	-	+	нагрузка
	3 ( $t_3..t_4$ )	+	-	+	сеть (C1)
	4 ( $t_4..t_5$ )	-	+	+	сеть (C1)
	5 ( $t_5..t_6$ )	Интервал бестоковой паузы			
3	1 ( $t_1..t_2$ )	+	-	-	нагрузка
	2 ( $t_2..t_3$ )	-	+	-	нагрузка
	3 ( $t_3..t_4$ )	-	+	+	нагрузка
	4 ( $t_4..t_5$ )	-	+	+	сеть (C1)
	5 ( $t_5..t_6$ )	Интервал бестоковой паузы			
4	1 ( $t_1..t_2$ )	+	-	-	load
	2 ( $t_2..t_3$ )	Интервал бестоковой паузы			
	3 ( $t_3..t_4$ )	-	+	+	сеть (C1)
	4 ( $t_4..t_5$ )	Интервал бестоковой паузы			

Примечание: «+» – ключ в проводящем состоянии; «-» – импульсы управления на ключ отсутствуют

Режим 1 характеризуется отсутствием импульсов управления на регулирующем транзисторе  $VT5$  (рис. 2).

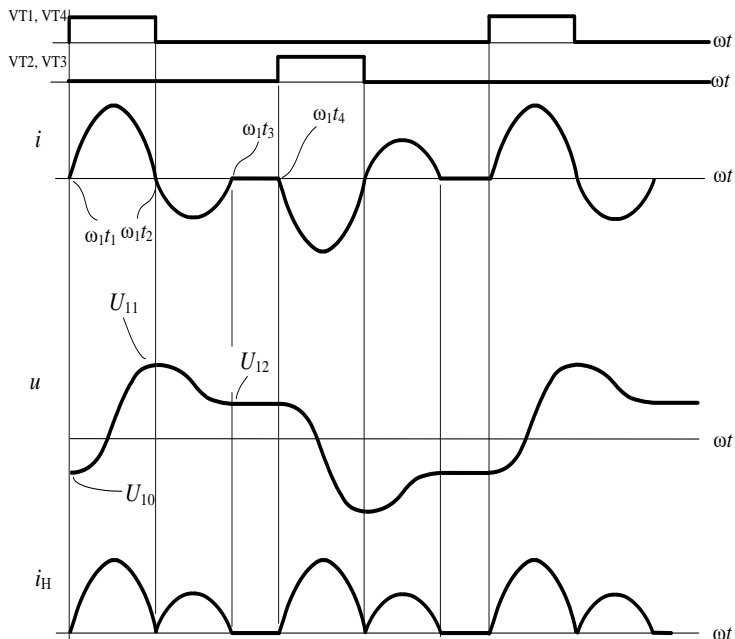


Рис. 2. Диаграммы работы КПП в режиме 1:  $i$  – ток РК;  $u$  – напряжение на конденсаторе C2;  $i_H$  – ток нагрузки;  $\omega_1 t_i \dots \omega_{i+1} t_{i+1}$  –  $i$ -ый интервал работы преобразователя.

На диаграмме можно выделить следующие характерные интервалы.

На интервале  $\omega_1 t_1 \dots \omega_1 t_2$ , который начинается с момента подачи сигнала управления на транзисторы VT1 и VT4, транзистор VT5 закрыт, поэтому происходит передача энергии в нагрузку  $U_H$ , от источника питания  $U_H$  через контур VT1 – L1 – C2 – TV – VT4. Одновременно с этим происходит перезаряд РК C2 от напряжения  $U_{10}$  до напряжения  $U_{11}$ . При этом ток в первичной обмотке TV имеет колебательный характер и определяется параметрами последовательного РК L – C.

На интервале  $\omega_1 t_2 \dots \omega_1 t_3$  ток первичной обмотки TV меняет полярность и протекает через обратные диоды VD1 и VD2 за счет энергии, накопленной в C2. При этом его напряжение несколько снижается до значения  $U_{12}$  за счет передачи части его энергии в цепь нагрузки. В конце интервала ток становится равным нулю и обратный диод запирается.

На интервале  $\omega_1 t_3 \dots \omega_1 t_4$  токи в цепях КПП не протекают, и напряжение конденсатора C2 сохраняется неизменным до момента подачи управляющего сигнала на транзисторы VT2 и VT3.

В режимах 2 и 3 импульсы управления  $VT3$  подаются на интервалах проводимости транзисторов диагонали и обратных диодов соответственно. В зависимости от импульсов управления, направление передачи энергии изменяется: энергия либо передается в нагрузку (ЕН), либо возвращается обратно в сеть (в конденсатор входного фильтра  $C1$ ).

В режиме 4, в отличие от предыдущих, ток через транзисторы  $VT1$  и  $VT4$  успевает упасть до нуля, но энергии, накопленной в конденсаторе  $C2$  не достаточно для отпираания обратных диодов  $VD1$  и  $VD4$ . В этом случае ток через диоды пойдёт с момента подачи импульса управления на транзистор  $VT5$ .

Каждому интервалу проводимости соответствует система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы. Определенные интервалы проводимости и их системы дифференциальных уравнений образуют математическую модель КПП [7].

### III. Исследование внешних и регулировочных характеристик

По математической модели [8] были рассчитаны и построены интегральные характеристики предложенного КПП – внешние и регулировочные характеристики. Изменяя напряжение нагрузки  $U_N^*$  с определённой дискретизацией, при фиксированных углах управления  $\beta$  транзистором  $VT5$ , можно получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения нагрузки от среднего значения приведенного тока нагрузки при различных углах управления). Внешние характеристики преобразователя представлены на рис. 3.

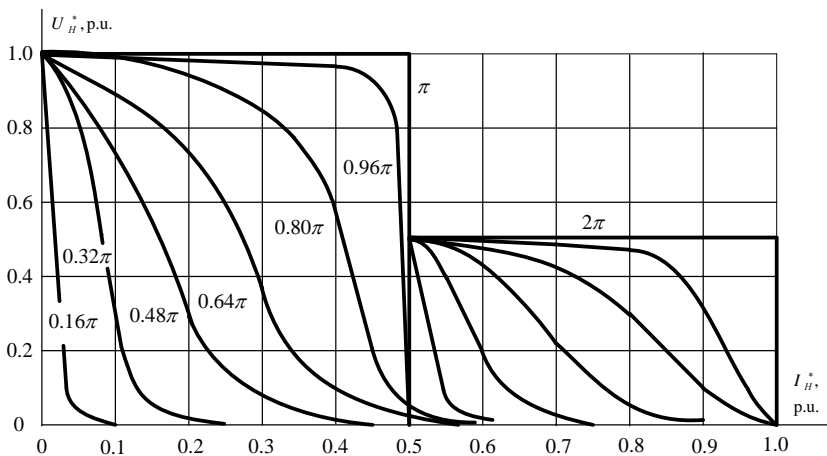


Рис. 3. Зависимость напряжения нагрузки от среднего значения приведенного тока нагрузки при различных углах управления  $\beta$

Рис. 3 показывает, что внешняя характеристика КРП при отсутствии импульсов управления является абсолютно жёсткой при значениях тока нагрузки  $0 \leq I_H^* \leq 1$  и абсолютно мягкой при  $I_H^* = 1$ . Внешняя характеристика, соответствующая углу управления  $\beta = 2 \cdot \pi$ , является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки,  $0 \leq I_H^* \leq 0,5$  с уровнем напряжения  $U_H^* = 1$ , а при значениях тока нагрузки  $0,5 \leq I_H^* \leq 1$  с уровнем напряжения  $U_H^* = 0,5$ . При значении тока нагрузки  $I_H^* = 0,5$  и  $I_H^* = 1$  характеристика абсолютно мягкая. Внешняя характеристика, соответствующая углу управления,  $\beta = \pi$ , является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки  $0 \leq I_H^* \leq 0,5$  с уровнем напряжения,  $U_H^* = 1$  и абсолютно мягкой при  $I_H^* = 0,5$ . Характеристика при  $\beta$  стремящейся к нулю стремится к абсолютно мягкой к нулевым током нагрузки. Характеристики при других углах управления  $\beta$  занимают промежуточные значения.

Регулировочные характеристики предлагаемого КРП (рис. 4) также могут быть получены из полученные из аналитической модели. Следует отметить, что регулировочные характеристики могут быть получены из внешних, и наоборот.

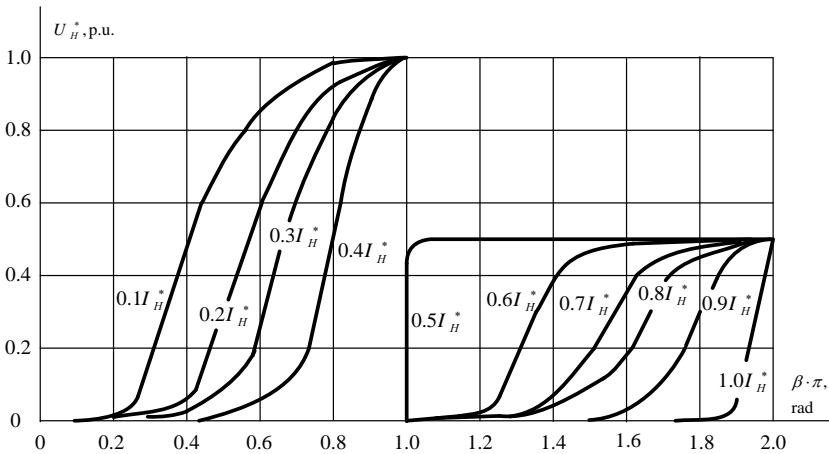


Рис. 4. Регулировочные характеристики КРП при различных значениях тока нагрузки

Из регулировочных характеристик видно, что при токе нагрузки  $0 \leq I_H^* \leq 0,5$  регулирование выходного напряжения осуществляется при углах управления  $0 \leq \beta \leq \pi$ , в пределах  $0 \leq U_H^* < 1$ , а при токе нагрузки  $0,5 \leq I_H^* < 1$  при углах  $\pi \leq \beta \leq 2\pi$ , в пределах  $0 \leq U_H^* < 0,5$ .

Помимо этого, с помощью аналитической модели были построены кривые изменения напряжения на конденсаторе  $C_2$ ; ток диагонали схемы, ток нагрузки, ток транзистора и среднее значение приведенного тока  $S_H$  ( $I_H^*$ ) в различных режимах работы схемы для одного полупериода работы преобразователя. На базе полученной математической модели выявлены основные закономерности электромагнитных процессов, происходящих в преобразователе, выполнены расчеты, которые позволили установить количественные взаимосвязи между параметрами элементов силовых цепей.

#### IV. Экспериментальный образец

Исследования режимов работы КРП на имитационной модели [5, 7] позволили рассчитать параметры основных элементов преобразователя. Полученные результаты легли в основу экспериментального образца КРП для блока системы импульсного питания ЕН (рис. 5).

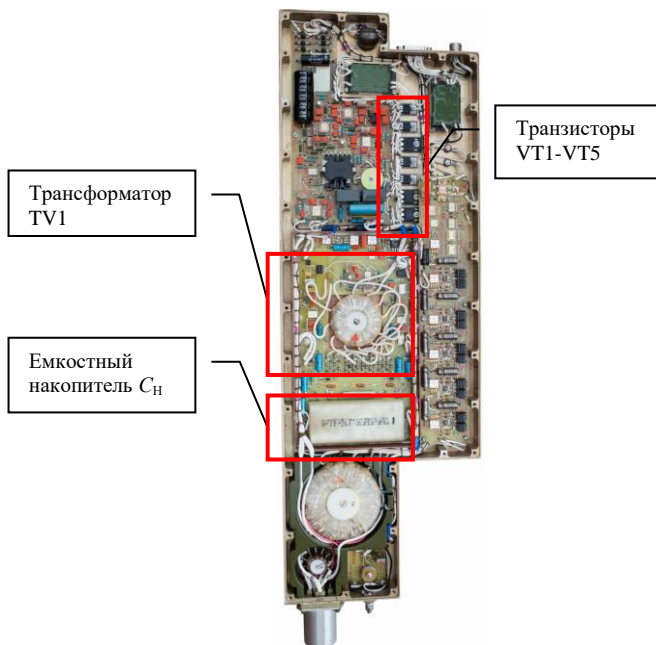


Рис. 5. Блок системы импульсного питания ЕН

На вход КРП (дополнительно к схеме на рис. 1) установлен трехфазный выпрямитель, обеспечивающий питание преобразователя от трехфазной сети переменного тока. Технические характеристики экспериментального образца КРП приведены в табл. 2.



Таблица 2.  
Технические характеристики экспериментального образца КРП

Параметр	Значение
Напряжения сети, В	220, трехфазное
Частота тока сети, Гц	400
Входное напряжение, В	300
Диапазон регулирования выходного напряжения, В	0-3000
Рабочая частота, кГц	33
Средний потребляемый зарядный ток от КРП, мА	60
Емкость ЕН, мкФ	2
Стабильность напряжения на ЕН, %	±2.5

Испытания экспериментального образца КРП доказали возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

#### В. Заключение

Предложен КРП с широтно-импульсной модуляцией с фиксированной рабочей частотой, обеспечивающий регулирование выходного напряжения в широком диапазоне (от 0 до 100 % номинального значения). С этой целью в схему преобразователя вводится шунтирующий транзистор. Регулирование выходного напряжения обеспечивается рекуперацией избытка энергии с выхода КРП на его входной конденсатор.

При работе с фиксированной высокой частотой не происходит уменьшения частоты и увеличения пульсаций напряжения в процессе регулирования. В силу этого обеспечивается низкий уровень пульсаций напряжения на ЕН и достигаются минимальные массогабаритные показатели трансформатора и выходного фильтра. Испытания экспериментального образца КРП доказали возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

Работа на фиксированной высокой частоте, пониженные потери в транзисторах и высокий уровень электромагнитной совместимости, а также возможность широтного регулирования выходного напряжения делают перспективным применение предложенного КРП.

© Стрелков В.Ф., 2020

© Дарьенков А.Б., 2020

© Ваняев В.В., 2020

- [1] Горяшин Н.Н., Лукьяненко М.В., Соломатова А.А., Хорошко А.Ю. Моделирование режимов параллельной работы квазирезонансных преобразователей напряжения с коммутацией ключевых элементов при нулевых значениях тока // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 4 (25). С. 53-58.
- [2] Горяшин Н.Н., Соломатова А.А. Оценка статических потерь мощности в квазирезонансном преобразователе напряжения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 4 (37). С. 13-19.
- [3] Пенин А.А. Квазирезонансный преобразователь напряжения с улучшенными параметрами // Электричество. 2009. № 2. С. 58-64.
- [4] Поляков В. Квазирезонансные преобразователи с дозированной передачей энергии для заряда емкостных накопителей // Силовая электроника. 2015. Т. 1. № 52. С. 52-56.
- [5] Стрелков В.Ф. Электротехнические комплексы радиолокационных станций: автореф. дис. докт. техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2016. – 40 с.
- [6] Долов В.Н., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Кочнев А.А. Квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания РЛС // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 2 (14). С. 27-32.
- [7] Стрелков В.Ф., Дарьенков А.Б., Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Квазирезонансный преобразователь с широким диапазоном регулирования выходного напряжения для систем электроснабжения ограниченной мощности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 91-100.
- [8] Стрелков В.Ф., Филатов И.Н., Ершова Е.А. Математическая модель квазирезонансного преобразователя // IV Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Актуальные проблемы энергетики», Декабрь 21, 2018, Н.Новгород, Россия. С. 20-30.

**V.F. Strelkov, A.B. Dar'enkov, V.V. Vanyaev**

## **QUASI-RESONANT CONVERTER WITH IMPROVED CHARACTERISTICS**

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

**Abstract.** The article is devoted to the development of a zero-current switching quasi-resonant converter (QRC). Its advantages are the natural limitation of the load current, a wide control range and a low level of output voltage ripple. The regulation of the output voltage is carried out due to the recovery of excess energy by the introduction of a transistor shunting the primary winding of the transformer. The principle of operation is described and the operating modes of the QRC are considered. Studies of the external and adjustment characteristics of the QRC for various modes of its operation were carried

out, which allowed one to determine the rational parameters of the converter components. The results of the research formed the basis for the manufacture of the prototype of switch-mode power supply of a storage capacitor. Tests of the prototype showed the promise of using the proposed QRC in autonomous power supply systems.

**Keywords:** charger, quasi-resonant converter, shunt transistor, switched-mode power supply, voltage regulation, zero-current switching.

### References

- [1] N.N. Goryashin, M.V. Lukyanenko, A.A. Solomatova and A.Y. Khoroshko, “Modeling of parallel operation of zero-current switching quasi-resonant converters”, *Vestnik of SibGAU*, no. 4 (25), pp. 53-58, 2009.
- [2] N.N. Goryashin and A.A. Solomatova, “Estimation of aggregated losses of power in a quasi-resonant converter”, *Vestnik of SibGAU*, no. 4 (37), pp. 13-19, 2011.
- [3] A.A. Penin, “A quasi-resonance voltage converter with improved parameters”, *Elektrichestvo*, no. 2, pp. 58-64, 2009.
- [4] V. Polyakov, “Kvazirezonsnyye preobrazovateli s dozirovannoy peredachej energii dlya zaryada emkostnykh nakopitelej [Quasi-resonant dosed energy converters for charging capacitive storage]”, *Silovaya elektronika [Power Electronics]*, vol. 1, no. 52, pp. 52-56, 2015 (in Russian).
- [5] V.F. Strelkov, “*Elektrotekhnicheskie komplekсы radiolokacionnyh stancij [Electrical complexes of radar stations]*”, *Doct. of Tech. S. thesis*, Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia, 2016 (in Russian).
- [6] V.N. Dolov, V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev and A.A. Kochnev, “Quasi-resonant inverter power pulsed radar system”, *Bulletin of Concern PVO Almaz-Antey*, vol. 2 (14), pp. 27-32, 2015.
- [7] V.F. Strelkov, A.B. Dar’enkov, E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and I.A. Lipuzhin, “Quasi-resonant converter with a wide range of output voltage regulation for limited power supply systems”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 3 (126), pp. 91-100, 2019.
- [8] V.F. Strelkov, I.N. Filatov and E.A. Ershova, “Matematicheskaya model' kvazirezonsnogo preobrazovatelya [Mathematical model of a quasi-resonant converter]”, in *proc. IV All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of energy]*, Dec. 21, 2018, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 20-30 (in Russian).

**НАШИ АВТОРЫ****ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

**Асабин Анатолий Александрович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; [asanatoliy@yandex.ru](mailto:asanatoliy@yandex.ru)

**Бедретдинов Рустам Шамилевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; [rsb88@yandex.ru](mailto:rsb88@yandex.ru)

**Белянин Игорь Владимирович** – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, кандидат технических наук; [belyanin@ioo.unn.ru](mailto:belyanin@ioo.unn.ru)

**Вагин Геннадий Яковлевич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; [es2@nntu.ru](mailto:es2@nntu.ru)

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

**Крюков Евгений Валерьевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; [kryukov@nntu.ru](mailto:kryukov@nntu.ru)

**Кузнецов Анатолий Викторович** – профессор Ульяновского государственного технического университета, доктор технических наук; [kav2@ulstu.ru](mailto:kav2@ulstu.ru)

**Петров Михаил Игоревич** – ассистент Национального исследовательского университета «МЭИ»; [michailpetrov1@gmail.com](mailto:michailpetrov1@gmail.com)

**Плехов Александр Сергеевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; [aplehov@mail.ru](mailto:aplehov@mail.ru)

**Прасол Дмитрий Александрович** – доцент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, кандидат технических наук; [dapras@mail.ru](mailto:dapras@mail.ru)

**Ревровская Диана Андреевна** – старший преподаватель Ульяновского государственного технического университета; [diana-06-08@mail.ru](mailto:diana-06-08@mail.ru)

**Севостьянов Александр Александрович** – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; [sevosaa@gmail.com](mailto:sevosaa@gmail.com)

**Соснина Елена Николаевна** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; [sosnyna@yandex.ru](mailto:sosnyna@yandex.ru)

**Федоров Георгий Викторович** – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **geogriy.fedorov@mail.ru**

**Щекин Владимир Александрович** – магистрант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; **79511540536@yandex.ru**

### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

**Аскарлов Алишер Бахрамжонович** – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета; **aba7@tpu.ru**

**Ваняев Валерий Владимирович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **epa@nntu.ru**

**Дарьенков Андрей Борисович** – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **darenkov@nntu.ru**

**Киевец Антон Владимирович** – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета; **kievec.v.l@gmail.com**

**Разживин Игорь Андреевич** – ассистент Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук; **Lionrash@tpu.ru**

**Рубан Николай Юрьевич** – доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук; **rubanny@tpu.ru**

**Рудник Владимир Евгеньевич** – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета; **fordlp006@mail.ru**

**Стрелков Владимир Федорович** – ведущий научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; **strelkov.428@nntu.ru**

**Суворов Алексей Александрович** – ассистент Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук; **suvorova@tpu.ru**

**Уфа Руслан Александрович** – доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук; **hcn@tpu.ru**

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

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

# **SMART ELECTRICAL ENGINEERING**

**№ 1**

**Nizhny Novgorod 2020**

**Smart electrical engineering** / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2020. No. 1 (9). – 113 p.

*The journal is issued 4 times in year*

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

**EDITORIAL STAFF**

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

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

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

*Electronic version of the journal:*

*<http://www.ie.nntu.ru>*

**ISSN 2658-6754**

© Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a. R.E. Alekseev, 2020

## CONTENTS

<b>CHRONICLES .....</b>	4
<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS .....</b>	5
<b>G.Ya. Vagin, A.A. Sevostyanov</b> Smart grid: requirements for electromagnetic compatibility of technical equipment.....	5
<b>A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya</b> Model for estimating efficiency of installing reactive power compensation devices in co sumer electric network.....	15
<b>A.A. Asabin, I.V. Belyanin, E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov, E.V. Kryukov</b> Control system of thyristor voltage regulator.....	25
<b>D.A. Prasol, V.A. Shchekin</b> Electrical system 110 kV operating modes features of sout west energy district of belgorod region.....	40
<b>E.V. Kalinin</b> Model of losses in laminated cores of power transformers..	52
<b>M.I. Petrov</b> Regulation of transformation ratio of transformer of AC voltage regulator with sinusoidal boost voltage.....	69
<b>G.V. Fedorov, A.S. Plekhov</b> Application of model-oriented approach in designing digital control systems for electrotechnical objects.....	78
<b>POWER ENGINEERIN .....</b>	85
<b>I.A. Razzhivin, N.Yu. Ruban, A.A. Suvurov, R.A. Ufa, A.B. Askarov, V.E. Rudnik, A.V. Kievets</b> Development of physical model of type 4 wind turbine static voltage converter within hybrid approach.....	85
<b>V.F. Strelkov, A.B. Dar'enkov, V.V. Vanyaev.</b> Quasi-resonant converter with improved characteristics .....	98
<b>Authors .....</b>	108



# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**№ 1**

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

*Редакция:*

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

Свободная цена

Подписано в печать 25.03.2020. Дата выхода в свет: 30.04.2020

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

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

---

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

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