

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2020

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. № 4 (12). – 108 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
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
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

ХРОНИКИ	4
Лоскутов А.Б. План ГОЭЛРО в XXI веке	4
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	6
Асабин А.А., Соснина Е.Н., Белянин И.В., Крюков Е.В., Бедретдинов Р.Ш., Ковин В.М. Экспериментальные исследования тиристорного регулятора напряжения	6
Соснина Е.Н., Шалуха А.В., Веселов Л.Е. О применении ТОТЭ на биогазе в системах электроснабжения сельскохозяйственных предприятий	27
Сугаков В.Г., Тошев А.А., Варламов Н.С. Исследование переходных процессов в системах регулирования возбуждения судовых синхронных генераторов с внешней форсировкой.....	42
Петушков М.Ю., Холодилов С.С. Нахождение неисправностей синхронных двигателей с постоянными магнитами по линейному току	52
Муссонов Г.П., Федосов Д.С., Просекин И.Н., Никонова П.А. Гармонические составляющие и насыщение электротехнической стали	61
Папков Б.В. Нижегородская научная школа профессора Е.М. Червоного	69
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	74
Серов А.И., Титов Е.Ю., Титов Д.Ю., Усачев Д.А. Регулируемый высоковольтный преобразователь для плазмохимических реакторов...	74
Алешкин Д.В., Гуляев И.В. Использование электронной нагрузки для исследования современных преобразователей электрической энергии	82
Белянин И.В., Шуваев Д.Н., Шарков В.В. Выбор оборудования и особенности построения систем управления для полупроводниковых переключающих устройств на базе контроллеров National Instruments	93
Наши авторы	103

ХРОНИКИ

ПЛАН ГОЭЛРО В XXI ВЕКЕ

В 2020 году исполнилось 100 лет плану ГОЭЛРО. План был принят 21 декабря 1920 г., и его реализация доказала всему миру высокую эффективность государственного планирования и управления. Г.М. Кржижановским были сформулированы основные задачи электрификации с учетом потребностей экономики всей страны:

- 1) техническое перевооружение всех отраслей народного хозяйства на базе использования электрической энергии;
- 2) обеспечение преимущественного роста тяжелой индустрии;
- 3) достижение опережающих темпов роста энергетического хозяйства;
- 4) строительство крупных современных электростанций;
- 5) широкое использование местных топливных ресурсов;
- 6) комплексное использование гидроресурсов для нужд энергетики;
- 7) строительство линий электропередач и создание Единой энергетической системы страны;
- 8) рациональное размещение энергетического хозяйства.

Современные задачи развития электроэнергетики существенно отличаются от тех, которые стояли перед страной в 1920 году, однако у них есть и много общего. Сегодня, в XXI веке, сохраняется преемственность взглядов на развитие электроэнергетики, важной частью которых стал план ГОЭЛРО. Создание новых производственных технологий, развитие инфраструктуры городов, транспорта, внедрение новых цифровых систем управления и мониторинга предъявляют новые требования к системам электроснабжения. В настоящее время требуются новые схемные решения в электрических сетях, новые цифровые устройства управления режимами сетей, новые устройства трансформации электроэнергии.

Отсутствие нормативно-правового и технического регулирования, как и дефицит необходимых для внедрения интеллектуальных устройств и технологических систем, сдерживает внедрение существующих инновационных разработок и технологических решений. Удельная плотность электрических нагрузок растет как в промышленном секторе, так и в городском хозяйстве. Широко применяемые радиально-магистральные сети часто не удовлетворяют новым требованиям надежности по качеству электроэнергии, пропускной способности и др. Плотная застройка в городах

затрудняет строительство новых подстанций. Кроме того, центры расчетных нагрузок стали динамично перемещаться по топологии сети в течение суток. При общей достаточной мощности наблюдается дефицит пропускной способности не только в периферийных узлах, но и в центрах питания. Конечно, внедрение напряжения 20 кВ позволяет решить ряд проблем. Однако практика показала, что в крупных мегаполисах этих мер недостаточно. В электроэнергетике стали широко применяться кольцевые сети, но их применение приводит к целому ряду сложностей:

- требуются новые виды защит от аварийных режимов;
- увеличиваются токи короткого замыкания;
- увеличивается емкостная проводимость сети;
- требуются устройства управления режимом сети в нормальном и аварийном режимах.
- требуются устройства и система мониторинга.

Справиться с решением перечисленных проблем можно только путем внедрения цифровых технологий. При этом возникает большая и сложная задача обеспечения информационной и кибербезопасности. Именно поэтому при эксплуатации электрических сетей следует избегать любых кольцевых схем. Новой реальностью для электрических сетей стала распределенная энергетика, в которой без цифровых технологий никак нельзя обойтись. Масштабы цифровизации и интеллектуализации, глубина преобразований и новизна технических решений, применяемых в настоящее время в электроэнергетическом комплексе России подобны реализации положений плана ГОЭЛРО.

Сегодня, как и сто лет назад, назрела острая необходимость в существенной и радикальной модернизации оборудования электрических станций, магистральных и распределительных сетей, электроприемников потребителей для обеспечения потребностей развивающейся цифровой экономики страны.

**А.Б. Лоскутов, главный редактор
журнала «Интеллектуальная электротехника»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Поступила в редакцию 08.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_06

УДК 621.316

**А.А. Асабин¹, Е.Н. Соснина¹, И.В. Белянин²,
Е.В. Крюков¹, Р.Ш. Бедретдинов¹, В.М. Ковин³**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

¹ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

³ ООО «ТЕКОМ»

Нижний Новгород, Россия

Разработан тиристорный регулятор напряжения (ТРН), позволяющий решить задачи управления потоками мощности и обеспечения качества электроэнергии. Дано описание экспериментального образца (ЭО) ТРН, состоящего из тиристорного коммутатора 0,4 кВ, силовых трансформаторов (шунтового и серийных), распределительного устройства 6 кВ. Изложены принципы работы ЭО ТРН, представлен ход и результаты его испытаний. Исследования проводились в четыре этапа: проверка силового оборудования, исследование СУ 1, исследование СУ 2, испытания ЭО ТРН в целом. Проведена проверка схем соединения, надежности контактных соединений. Подтверждена правильность отработки системой управления заложенных алгоритмов, корректность выполняемых и передаваемых команд, а также передаваемых и получаемых данных. Результаты исследования ТРН в целом показали, что экспериментальный образец обеспечивает плавность и заданную точность регулирования напряжения во всех режимах. Диапазон регулирования выходного напряжения относительно входного составил $\pm 10\%$. Дискретность регулирования не превышает $1,5\%$. Диапазон изменения угла сдвига выходного напряжения относительно входного равен $\pm 5^\circ$. Проведенные исследования подтвердили работоспособность ЭО ТРН и его готовность к опытной эксплуатации.

Ключевые слова: тиристорный регулятор напряжения, исследовательские испытания, регулирование потоков мощности, система управления, экспериментальный образец, энергетический интернет.

1. Введение

Развитие электроэнергетики и ее переход на новый технологический уровень связаны с реализацией концепции Интернета энергии [1, 2]. Данная технология направлена на преобразование электрических сетей из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии в активное, обеспечивающее энергетическую безопасность и качество электроснабжения [3, 4]. Взаимодействие распределенных источников электроэнергии, накопителей и активных потребителей будет реализовано на основе «горизонтальных» связей и многосторонних сервисов. Такой подход позволит сохранить преимущества как централизованных, так и децентрализованных систем электроснабжения [5, 6].

При построении распределительных электрических сетей (РЭС), функционирующих по принципу Интернета энергии, требуется решить две основные задачи: управление потоками мощности и обеспечение качества электроэнергии [7]. Они решаются при помощи устройств, реализующих технологии *D-FACTS (Distributed Flexible Alternative Current Transmission Systems)* [8-12]. В настоящее время устройства *D-FACTS* находятся либо в разработке, либо на стадии опытной эксплуатации.

Низкое качество электроэнергии в РЭС 6-10 кВ зачастую обусловлено отклонениями напряжения. Для регулирования уровней напряжения применяют РПН и линейные регуляторы [13-18]. Широко используются вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) [19]. Основным недостатком ВДТ является низкое быстродействие, что делает неэффективным их применение в электрических сетях с динамической нагрузкой. Тиристорный регулятор напряжения (ТРН), экспериментальный образец которого разработан учеными Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, позволяет решить задачи управления потоками мощности и обеспечения качества электроэнергии

Принцип действия ТРН основан на совместном использовании продольного (изменение амплитуды) и поперечного (изменение фазы) регулирования напряжения. Введение в линию вольтодобавки при продольном регулировании позволяет изменять уровни напряжения на шинах потребителя. Изменение фазы выходного напряжения при поперечном регулировании позволяет управлять потоками активной и реактивной мощности. От электромеханических регуляторов ТРН выгодно отличается быстродействием, коммутационным ресурсом и возможностью плавного регулирования.

Статья посвящена исследованиям работоспособности экспериментального образца (ЭО) ТРН, эффективности алгоритмов функционирования его системы управления и готовности ЭО к опытной эксплуатации.

II. Принцип работы тиристорного регулятора напряжения

На рис. 1 представлена принципиальная схема ТРН.

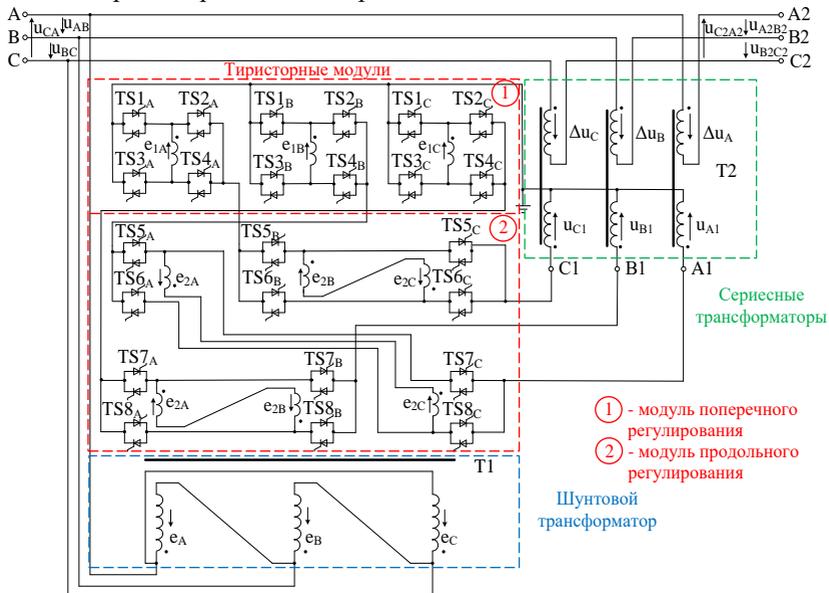


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части ТРН

Основу ТРН составляют тиристорные модули продольного и поперечного регулирования, шунтовой и серийные трансформаторы. Первичные обмотки шунтового трансформатора Т1 соединены в «треугольник». Вторичные обмотки каждой из трех фаз Т1 выполнены в виде трех гальванически развязанных секций.

Секции с ЭДС1 (e_{1A} , e_{1B} , e_{1C}) формируют трехфазную систему напряжений для питания модуля поперечного регулирования (TS1–TS4). Секции с ЭДС2 (e_{2A} , e_{2B} , e_{2C}) формируют трехфазную систему напряжений для питания модуля продольного регулирования (TS5–TS8). Модули поперечного и продольного регулирования каждой фазы выполнены по схеме реверсивного моста переменного тока. Диагонали мостов соединены последовательно и образуют цепи питания первичных обмоток серийных трансформаторов (Т2). Вторичные обмотки Т2 включены в рассечку фаз линий распределительной сети. Их напряжения суммируются с входным напряжением ТРН. Тиристорные коммутаторы, вынесенные в цепи вторичных обмоток Т1, находятся под низким потенциалом. Это существенно снижает требования к их изоляции от элементов конструкции.

Требуемый диапазон регулирования выходного напряжения ТРН по продольной и поперечной составляющим обеспечивает выбор коэффициента трансформации регулировочных секций. Использование импульсно-фазового принципа регулирования позволяет плавно изменять амплитуду и фазу выходного напряжения и обеспечить требуемую точность регулирования. Для реализации импульсно-фазового управления ТРН применен разработанный при участии авторов способ двухзонного поочередного регулирования [20-22]. Он обеспечивает надежную работу ТРН на холостом ходу, а также при любом фазовом сдвиге тока нагрузки.

Режим прямой передачи входного напряжения на выход ТРН реализуется при включенных коммутаторах TS3, TS4 и TS6, TS8 всех фаз. При этом все вторичные обмотки T2 исключаются из цепи питания T1, а первичные обмотки T2 оказываются замкнутыми на нейтраль, и их напряжения, а также напряжения вторичных обмоток Δu , равны нулю. В результате этого выходные напряжения ТРН равны соответствующим входным напряжениям:

$$u_{A1B1} = u_{A2B2};$$

$$u_{B1C1} = u_{B2C2};$$

$$u_{C1A1} = u_{C2A2}.$$

При поперечном регулировании изменяются фазы выходного напряжения. Это позволяет управлять потоками активной и реактивной мощности в линии электрической сети. При этом формируются напряжения, сдвинутые на 90° относительно фазных напряжений сети.

Возможна реализация режимов запаздывания и опережения выходного напряжения ТРН относительно входного. Режим запаздывания реализуется при включенных коммутаторах TS2, TS3 и TS6, TS8 всех фаз. При этом в цепи питания первичных обмоток T2 вводятся ЭДС e_{1A} , e_{1B} , e_{1C} , отличающиеся от входных напряжений ТРН пропорционально коэффициенту трансформации ступеней поперечного регулирования T1 (k_{11}). Следует отметить, что для фазы А используется ЭДС фазы В (e_{1B}), находящаяся в противофазе с линейным напряжением u_{B1C1} . Аналогично для напряжений фаз В и С используются ЭДС фаз С (e_{1C}) и А (e_{1A}) соответственно. Указанные ЭДС находятся в противофазе с входными линейными напряжениями u_{C1A1} , u_{A1B1} . Соответственно в расщелку линии вводятся добавки напряжения вторичных обмоток $\Delta u_{A\text{нп}}$, $\Delta u_{B\text{нп}}$, $\Delta u_{C\text{нп}}$, отличающиеся от напряжений первичных обмоток u_{A1} , u_{B1} , u_{C1} пропорционально коэффициенту трансформации (k_2) T2:

$$\Delta u_{A\text{нп}} = k_2 \cdot u_{A1} = k_2 \cdot e_{1B} = -k_{11} \cdot k_2 \cdot u_{B1C1};$$

$$\Delta u_{B\text{нп}} = k_2 \cdot u_{B1} = k_2 \cdot e_{1C} = -k_{11} \cdot k_2 \cdot u_{C1A1};$$

$$\Delta u_{\text{ТПН}} = k_2 \cdot u_{C1} = k_2 \cdot e_{1A} = -k_{11} \cdot k_2 \cdot u_{A1B}.$$

Векторная диаграмма входных и выходных линейных напряжений для режима запаздывания приведена на рис. 2а. Из представленной диаграммы следует, что введение в линию каждой фазы ступени поперечного регулирования позволяет получить на выходе ТРН линейные напряжения, отстающие по фазе относительно входных напряжений на угол α .

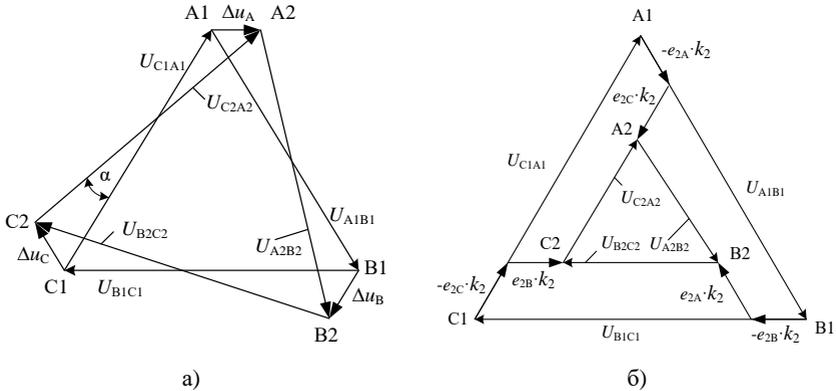


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений: в режиме запаздывания (а); в режиме понижения напряжения (б)

Можно показать, что ЭДС e_{1A} , e_{1B} , e_{1C} реверсируются при включенных коммутаторах TS1–TS4 и TS6–TS8 всех фаз. Благодаря этому, реализуется режим опережения выходного напряжения ТРН относительно входного также на угол α .

Изменение фазы выходного напряжения относительно входного позволяет регулировать потоки активной и реактивной мощности, передаваемые по линии электропередачи переменного тока между двумя узлами электрической сети, которые определяются выражениями:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{x_{PL}} \cdot \sin \delta; \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{1}{x_{PL}} \cdot (U_1^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta); \quad (2)$$

$$Q_2 = \frac{1}{x_{PL}} \cdot (U_2^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta), \quad (3)$$

где U_1 и U_2 – напряжения начала и конца ЛЭП; Q_1 и Q_2 – реактивная мощность начала и конца ЛЭП; $x_{\text{ЛЭП}}$ – реактивное сопротивление ЛЭП; δ – угол между векторами напряжений U_1 и U_2 .

Модули продольного регулирования питаются от вторичных обмоток Т1 с величиной ЭДС e_{2A} , e_{2B} , e_{2C} . Причем ЭДС вторичных обмоток e_{2A} , e_{2B} , e_{2C} находятся в противофазе с входными линейными напряжениями ТРН u_{A1B1} , u_{B1C1} , u_{C1A1} и отличаются от них по величине пропорционально коэффициенту трансформации (k_{12}).

При включенных коммутаторах $TS6_A$, $TS7_C$ и включенных $TS3$, $TS4$ всех фаз в цепь питания фазы A первичной обмотки Т2 вводится разность ЭДС ступеней продольного регулирования $e_{2C}-e_{2A}$. Соответственно, при включенных коммутаторах $TS8_A$, $TS7_B$ и $TS6_B$, $TS5_C$ в цепи питания фаз B и C Т2 вводятся разности ЭДС $e_{2A}-e_{2B}$ и $e_{2B}-e_{2C}$. Таким образом в рассечку линии ТРН вводятся добавки напряжения вторичных обмоток $\Delta u_{Aпр}$, $\Delta u_{Bпр}$, $\Delta u_{Cпр}$, отличающиеся от указанной геометрической разности пропорционально коэффициенту трансформации Т2 k_2 :

$$\begin{aligned}\Delta u_{Aпр} &= k_2 \cdot u_{A1} = k_2 \cdot (e_{2C} - e_{2A}) = k_{12} \cdot k_2 \cdot (u_{A1B1} - u_{C1A1}); \\ \Delta u_{Bпр} &= k_2 \cdot u_{B1} = k_2 \cdot (e_{2A} - e_{2B}) = k_{12} \cdot k_2 \cdot (u_{B1C1} - u_{A1B1}); \\ \Delta u_{Cпр} &= k_2 \cdot u_{C1} = k_2 \cdot (e_{2B} - e_{2C}) = k_{12} \cdot k_2 \cdot (u_{C1A1} - u_{B1C1}).\end{aligned}$$

Векторная диаграмма напряжений для режима понижения напряжения приведена на рис. 26.

Режим повышения выходного напряжения ТРН реализуется при включенных коммутаторах $TS5_A$, $TS8_C$, $TS5_B$, $TS6_C$, $TS7_A$, $TS8_B$ и коммутаторах $TS3$, $TS4$ всех фаз. В данном случае реверсируются ЭДС (e_{2A} , e_{2B} , e_{2C}), питающие первичные обмотки серийного трансформатора. Совместное использование модулей продольного и поперечного регулирования позволяет реализовать продольно-поперечное регулирование выходного напряжения ТРН. Разработанные технические и схемные решения легли в основу экспериментального образца ТРН.

III. Экспериментальный образец тиристорного регулятора напряжения

Основные технические характеристики ЭО ТРН приведены в табл. 1. Он представляет собой подстанцию 6 кВ контейнерного типа, состоящую из тиристорных модулей продольного и поперечного регулирования 0,4 кВ, трехфазного шунтового и трех однофазных серийных трансформаторов и распределительного устройства 6 кВ. Внешний вид ЭО ТРН приведен на рис. 3.

Таблица 1.
Технические характеристики ЭО ТРН

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение, кВ	$6 \pm 10 \%$
Диапазон изменения угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного, °	± 5
Дискретность изменения сдвига основной гармоники выходного напряжения, °	1,5
Диапазон регулирования амплитуды выходного напряжения относительно входного, %	± 10
Дискретность регулирования действующего значения выходного напряжения, %	$\leq 1,5$
Мощность нагрузки, кВА	≤ 630
Мощность шунтового трансформатора, кВА	106
Мощность серийных трансформаторов, кВА	3×28

На рис. 4 показаны основные блоки программной части СУ 1. Аппаратная часть СУ 1 реализована на трех контроллерах *NI myRIO*. Это необходимо для увеличения скорости обработки данных. Контроллер осуществляет взаимодействие 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.

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 контроллера, в ПЛИС формируются импульсы для управления тиристорами ТРН.

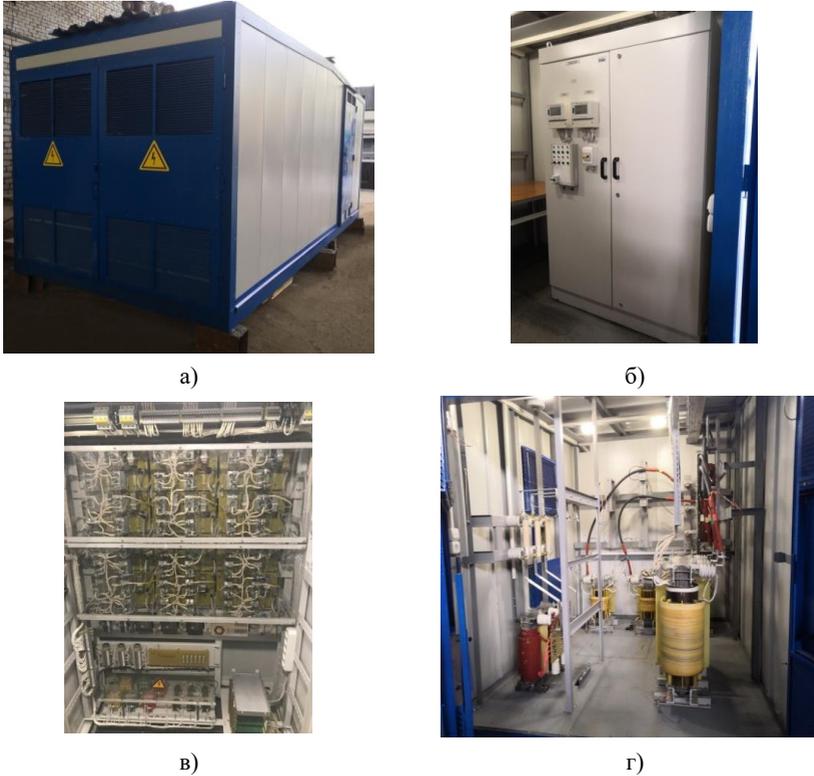


Рис. 3. Внешний вид экспериментального образца ТРН: общий вид (а); шкаф тиристорных коммутаторов (б); тиристорные модули (в); отсек силовых трансформаторов (г)

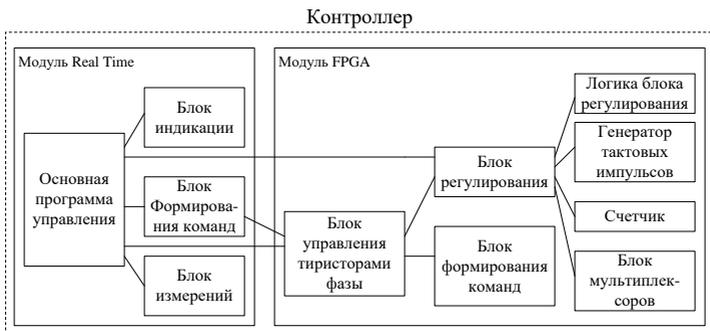


Рис. 4. Структурная схема программной части СУ 1 ЭО ТРН

На уровне *FPGA* из входящего синусоидального сигнала выделяют моменты перехода через ноль, анализируется, когда синус находится в положительном и отрицательном состоянии, а также формируются синхронизирующие импульсы при смене знака с минуса на плюс U_{0+} .

На рис. 5 показана реализация блока регулирования.

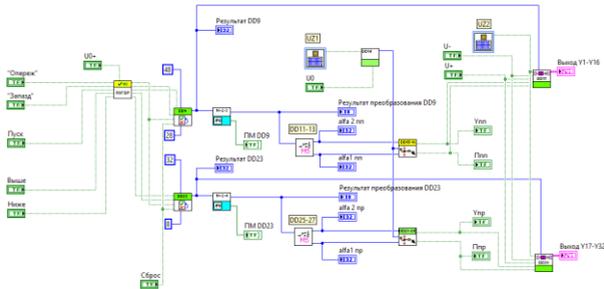


Рис. 5. Блок регулирования СУ 1 ЭО ТРН

Управление ТРН осуществляется через специализированный интерфейс панели управления. Внешний вид панели управления показан на рис. 6.

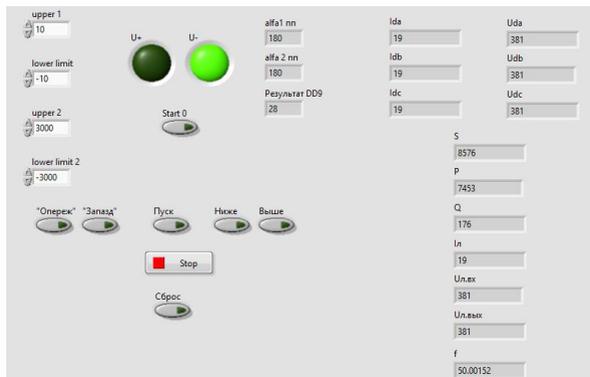


Рис. 6. Внешний вид панели управления СУ 1 ЭО ТРН

СУ второго уровня (СУ 2) выполняет функции централизованного управления и мониторинга с последующей выработкой управляющих команд для СУ 1, а также хранения, передачи и удаленного доступа к информации [23].

Функциональная схема СУ 2 показана на рис. 7.



Рис. 7. Функциональная схема СУ 2 ЭО ТРН

На входе и выходе ЭО ТРН подключены измерительные устройства ЭНИП-2, позволяющие рассчитывать действующее значение напряжения, тока и фазы. Отслеживаемые параметры передаются СУ 2 с заданной периодичностью по протоколу *Modbus TCP*.

СУ 2 выполняет функции накопления, обработки получаемых данных и дальнейшей передачи анализируемых параметров оператору. Кроме того, формируются управляющие воздействия для СУ 1. Для этого между контроллерами СУ 1 и СУ 2 устанавливается соединение через собственный интерфейс передачи данных. СУ 2 содержит две подсистемы – ЦСУС (централизованная система управления сетью) и СУР (система управления регулятором). В качестве протокола обмена данными и управляющими сигналами в сети СУР – ЦСУС выступает *XML-RPC*. Для управления параметрами конфигурации СУР используется консоль СУР. ЦСУС производит сбор и обработку информации, получаемой от СУР. Накопленная информация может быть визуализирована в клиенте ЦСУС и использована для формирования управляющих воздействий на СУ 1. Устройства, входящие в состав СУ 2, объединены в локальную вычислительную сеть через коммутатор посредством высокоскоростного соединения Ethernet. Система ЦСУС может находиться на удалении. Для этого организован канал связи между двумя коммутаторами.

В основе функционирования СУ 2 лежат следующие алгоритмы:

- алгоритм агрегации данных, полученных СУР;
- алгоритм определения состояния сети и отложенной передачи сообщений;
- алгоритм отслеживания аварийных ситуаций по превышению пороговых значений.

Работоспособность силового оборудования ЭО ТРН, системы управления и устройства в целом были проверены экспериментально.

IV. Экспериментальные исследования тиристорного регулятора напряжения

Основными задачами экспериментальных исследований являются:

- подтверждение целесообразности применения двухзонного поочередного регулирования для реализации СУ 1 тиристорного регулятора с целью управления потоками мощности и регулирования уровней напряжения в распределительных электрических сетях (РЭС) 6-20 кВ;
- проверка соответствия технических характеристик ЭО ТРН данным, заявленным в табл. 1;
- отладка взаимодействия СУ 1 и СУ 2;
- проверка правильности отработки алгоритмов, заложенных в СУ 2, корректности выполняемых и передаваемых данных.

В процессе исследований ЭО ТРН выполнены четыре комплекса испытаний: 1 – проверка силового оборудования, 2 – исследование СУ 1, 3 – исследование СУ 2, 4 – испытания ЭО ТРН в целом.

1– Испытания силовой части тиристорного регулятора напряжения

При испытании силового оборудования ЭО ТРН были выполнены следующие операции:

- проверка схем соединения (трансформаторного и измерительного оборудования, блока тиристорных коммутаторов);
- проверка целостности проводников и полупроводниковых элементов, а также надежности контактных соединений (проверка изоляции проводников, целостности корпусов тиристоров, цепей блоков импульсных усилителей);
- проверка полярности и величины напряжения питания плат импульсных усилителей и пульта местного управления.

По результатам проверки силовой части установлено следующее:

- сопротивление изоляции РУ 6 кВ составляет не менее 1000 МОм, сопротивление изоляции сети 0,4 кВ – не менее 1 МОм;
- электрическая прочность изоляции РУ 6 кВ и 0,4 кВ испытательным напряжением промышленной частоты соответствует нормам;
- поломок и отказов аппаратуры главных цепей не выявлено, электрические цепи функционируют исправно, блокировки исправны, и при этом не произошло повреждений, препятствующих их дальнейшей работе;
- сопротивление контактов разъемных соединений не превышает 75 мкОм;
- сопротивление болтовых или сварных соединений шин не превышает более чем в 1,2 раза сопротивление участка шин той же длины без соединений.

2 – Испытания СУ 1 ЭО ТРН

Испытания СУ 1 заключались в проверке правильности реализации и функционирования алгоритма управления тиристорами. Была проведена проверка прохождения всех управляющих сигналов. Вычислены и заложены в постоянное запоминающее устройство настройки для основных и вспомогательных модулей программы. Выполнена отладка блоков программы при возникновении аварийных ситуаций. Проверены корректность включения тиристоров в режимах поперечного, продольного и продольно-поперечного регулирования напряжения и корректность формирования импульсов управления в момент перехода напряжения через ноль.

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

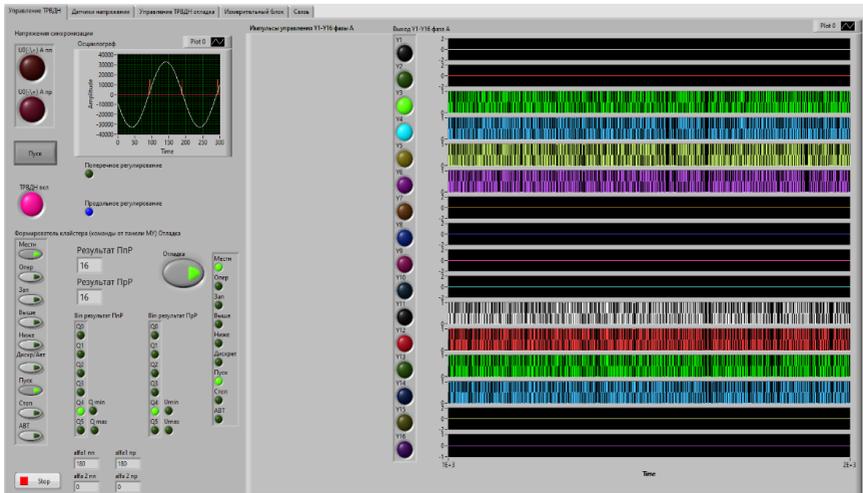


Рис. 8. Панель управления контроллера СУ 1 во время испытаний

В результате проведенных исследований установлено, что в режимах продольного и поперечного регулирования импульсы управления системой управления подаются только на тиристоры, которые заложены алгоритмом, что указывает на корректность работы системы управления. На рис. 9 показан пример осциллограммы формирования импульсов управления.

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

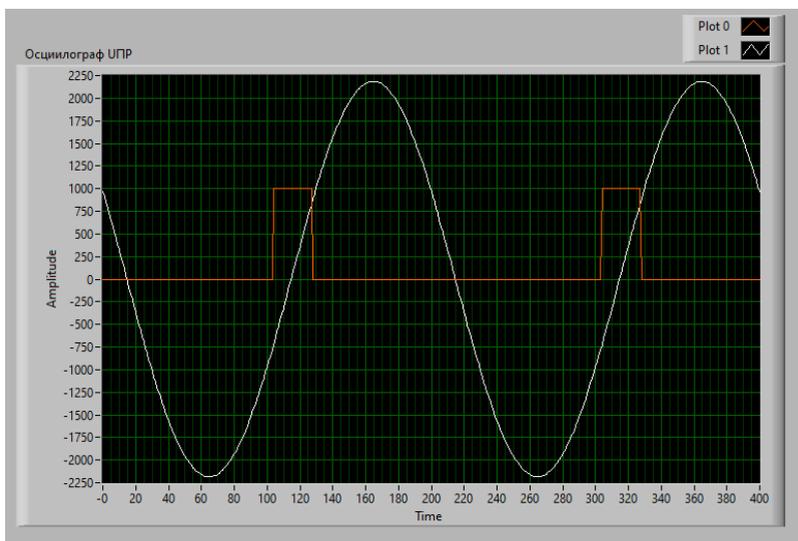


Рис. 9. Синхронизирующие импульсы, сформированные датчиком высокого напряжения при переходе синусоиды напряжения через ноль с отрицательного значения в положительное

3 – Испытания СУ 2 ЭО ТРН

При испытании СУ 2 уровня проведена проверка:

- основных подсистем логики действий;
- взаимодействия с внешней системой мониторинга и управления;
- взаимодействия с пользователем;
- централизованного сбора, хранения и обработки данных; отслеживания сбоев в работе оборудования и каналов связи;
- уведомления пользователей системы о наличии сбоев;
- защиты и аутентификации.

Генераторы сигналов были подключены к соответствующим линиям и формировали сигналы с параметрами напряжения, тока, фазового сдвига в границах диапазона допустимых значений. На сервисном ноутбуке осуществлялся запуск консоли, в которой отслеживались значения параметров ЭО ТРН, а также подавались команды управления на СУ 1.

В результате испытаний подтверждена правильность отработки СУ 2 заложенных алгоритмов, корректность выполняемых и передаваемых команд, а также передаваемых и получаемых данных. Подтверждена корректность отображения состояния оборудования и линий связи.

В ходе экспериментов были подтверждены корректность передаваемых аварийных сообщений, возможность их комментирования, квитирования, фильтрации, навигации от сообщения к объекту, сгенерировавшему его. Подтверждены также функции отображения и экспортирования истории архивных аварийных сообщений и создание звуковых и почтовых оповещений об аварийных событиях. Подтверждена корректность поступления звуковых и почтовых оповещений о сбоях в каналах связи и в оборудовании.

4 – Испытания ЭО ТРН в целом

Экспериментальные исследования ТРН в целом проведены в режимах продольного, поперечного и продольно-поперечного регулирования напряжения. На рис. 10 показан пример осциллограммы формирования импульсов управления тиристорами в режиме продольного регулирования. При переключении номеров режимов ТРН меняется длительность импульсов управления, причем частота заполнения самих импульсов составляет 10 кГц, что обеспечивает стабильность процесса открытия тиристоров.

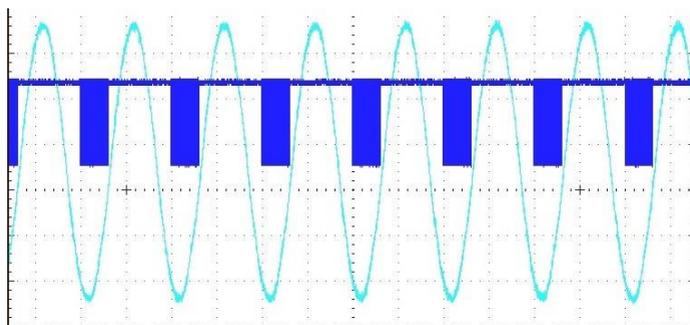


Рис. 10. Осциллограмма формирования импульсов управления на тиристоры и синхронизирующее напряжение фазы A в режиме продольного регулирования

На рис. 11 показан пример осциллограммы выходных напряжений ТРН в режиме продольного регулирования. Анализ результатов показал, что диапазон регулирования выходного напряжения относительно входного составляет $\pm 10\%$. Дискретность регулирования не превышает $1,5\%$.

На рис. 12 показан пример осциллограммы выходных напряжений ТРН в режиме поперечного регулирования. Анализ результатов показал, что диапазон изменения угла сдвига выходного напряжения относительно входного равен $\pm 5^\circ$.

На рис. 13 показан пример осциллограммы выходных напряжений ТРН в режиме продольно-поперечного регулирования.

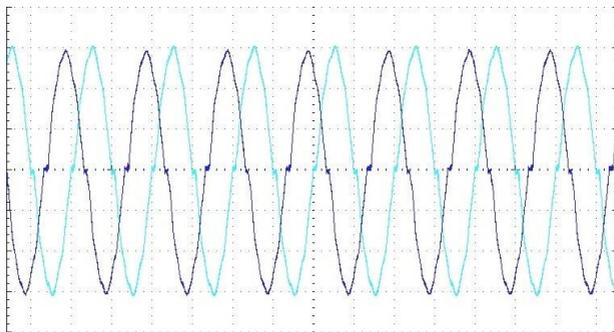


Рис. 11. Осциллограмма выходных напряжений фаз A и C в режиме продольного регулирования (режим понижения напряжения)

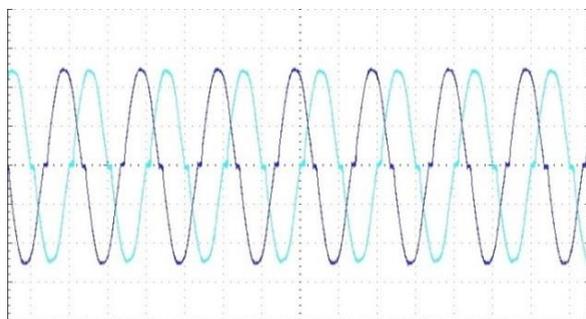


Рис. 12. Осциллограмма выходных напряжений фаз A и C в режиме поперечного регулирования (режим запаздывания)

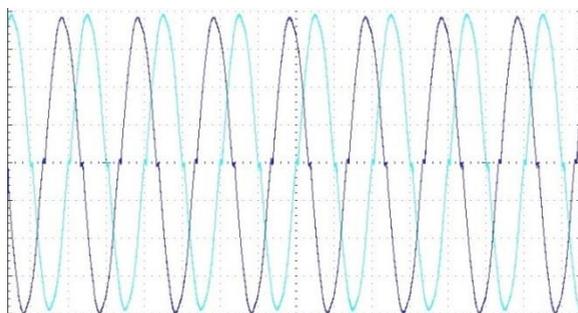


Рис. 13. Осциллограмма выходных напряжений фаз A и C в режиме продольно-поперечного регулирования (режим понижения напряжения и запаздывания)

Результаты исследований показали корректность подачи импульсов управления тиристорами в полном соответствии с разработанным алгоритмом. Было установлено, что ЭО ТРН обеспечивает плавность и заданную точность регулирования напряжения во всех режимах.

V. Выводы

Построение электроэнергетических систем по принципу энергетического интернета сопровождается необходимостью реализации гибкого потокораспределения в сетях с многоконтурной конфигурацией и несколькими источниками питания. Осуществить данную функцию в распределительных электрических сетях 6-20 кВ позволяет применение тиристорного регулятора напряжения.

Разработан и изготовлен экспериментальный образец тиристорного регулятора напряжения, позволяющий осуществлять регулирование напряжения в распределительной электрической сети, как по амплитуде, так и по фазе. Это дает возможность перераспределять потоки мощности и оптимизировать напряжение в узлах нагрузки.

Проведены экспериментальные исследования силового оборудования, систем управления 1 и 2 уровней (СУ 1 и СУ 2) и ЭО ТРН в целом.

В результате испытания силового оборудования подтверждена корректность собранных схем соединения (блока тиристорных коммутаторов, трансформаторного и измерительного оборудования), а также проверена надежность контактных соединений.

При испытании СУ 1 получена качественная характеристика входных и выходных сигналов. Установлено, что импульсы управления тиристорами формируются строго по разработанному алгоритму.

В результате испытаний СУ 2 подтверждена правильность отработки заложенных алгоритмов, корректность выполняемых и передаваемых команд, а также передаваемых и получаемых данных.

Результаты исследования ЭО ТРН в целом показали, что устройство обеспечивает плавность и заданную точность регулирования напряжения во всех режимах работы.

Проведенные исследования подтвердили работоспособность экспериментального образца ТРН и алгоритмов его функционирования, а также готовность ЭО ТРН к опытной эксплуатации.

© Асабин А.А., 2020

© Соснина Е.Н., 2020

© Белянин И.В., 2020

© Крюков Е.В., 2020

© Бедретдинов Р.Ш., 2020

© Ковин В.М., 2020

Библиографический список

- [1] Hua H., Cao J. Towards intelligent energy control and optimization in energy Internet: A review // 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), May 27-31, 2019, Nanjing, China. 2019. С. 573-578. DOI: 10.1109/ICEI.2019.00107.
- [2] Cheng L., Qi N., Zhang F., Kong H., Huang X. Energy Internet: Concept and practice exploration // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Nov. 26-28, 2017, Beijing, China. 2018. С.1-5. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245533.
- [3] Наумов В.А., Матисон В.А. От автоматизированной электроэнергетики к интернету энергии // Энергия единой сети. 2019. № 2 (44). С. 36-44.
- [4] Sakib N., Hossain E., Ahamed S.I. A qualitative study on the United States internet of energy: A step towards computational sustainability // IEEE Access. 2020. № 8. С. 69003-69037. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986317.
- [5] Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9-27. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9.
- [6] Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2-14. DOI: 10.25728/ru.2019.1.1.
- [7] Веселов Ф.В., Дорофеев В.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 43-52.
- [8] Kumari R., Roy P. and C. Modelling of UPFC (Unified Power Flow Control) to improve stability of power system by real and reactive power control of transmission line // Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering, Singapore: Springer, 2017, vol. 442. С. 647-655. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6_62.
- [9] Hussein N.A., Eisa A.A., Mahmoud H.M., Shehata S.A., Othman E.A. Interline power flow controller (IPFC) characterization in power systems // International Journal of Engineering & Technology. 2018. № 7 (3). С. 1656-1665. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.14894.
- [10] Kumbhare P.P., Nimje A.A., Sawarkar P.R. Application of distributed static series compensator for improvement of power system stability // Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 718, Mishra A., Basu A., Tyagi V. Singapore: Springer, 2018. – С. 27-34. DOI: 10.1007/978-981-10-7656-5_4.
- [11] Hardas A.V., Rajderkar V., Chandrakar D.V.K., Hardas V.D. Optimum location of thyristor controlled phase angle regulator based on performance index // 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS), June 12-13, 2018, Nagpur, India, 2018. С. 132-136. DOI: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536084.
- [12] Kathal P., Bhandakkar A. Power flow control in power system using FACT device thyristor controlled series capacitor (TCSC): A review // International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE). 2013. № 1 (3). С. 82-91.

- [13] Ranamuka D., Agalgaonkar A.P., Muttaqi K.M. Online coordinated voltage control in distribution systems subjected to structural changes and DG availability // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014. № 5 (2). С. 617-628. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2277719.
- [14] Petintin J.O., Shaaban M. Voltage regulation in a smart distribution system incorporating variable renewable generation // *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, May 20-23, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. С. 583-588. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873857.
- [15] Bot Y., Allali A. Using DGUPFC to control the voltage of multi-feeder smart distribution system // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017. № 7 (4). С. 1656-1662.
- [16] Bot Y., Allali A. Using D-UPFC in voltage regulation of future distribution systems // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2015. №5 (2). С. 581-585.
- [17] Wang S., Chen S., Ge L., Wu L. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2016. № 7 (3). С. 1111-1123. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2529627.
- [18] Yan R., Li Y., Saha T.K., Wang L., Hossain M.I. Modeling and analysis of open-delta step voltage regulators for unbalanced distribution network with photovoltaic power generation // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. № 9 (3). С. 2224-2234. DOI: 10.1109/TSG.2016.2609440.
- [19] Pullawar P.V., Paraskar S.R., Jadhao S.S. Voltage sag mitigation in real time using booster transformer // *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*. 2015. № 2 (6). С. 164-168.
- [20] Sosnina E., Asabin A., Kralin A., Kryukov E. Voltage control with thyristor-regulated booster transformer // *2018 Int. Conf. on Smart Grid (icSmartGrid)*, Dec. 4-6, 2018, Nagasaki, Japan, 2019. С. 202-207. DOI: 10.1109/ISGWCP.2018.8634477.
- [21] Асабин А.А., Белянин И.В., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В. Система управления тиристорного регулятора напряжения // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. № 1 (9). С. 25-39. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_1_25.
- [22] Асабин А.А. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора, Пат. 2398342 RU, заявл. 23.06.09; опубл. 27.08.10. – Бюл. № 24.
- [23] Sosnina E., Bedretdinov R., Kryukov E., Smirnov A. Active-adaptive control system of the thyristor voltage regulator // *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, May 21-24, 2019, Chengdu, China, 2019. С. 1165-1169. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881770.

A.A. Asabin¹, **E.N. Sosnina**¹, **I.V. Belyanin**², **E.V. Kryukov**¹,
R.Sh. Bedretdinov¹, **V.M. Kovin**³

THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR EXPERIMENTAL RESEARCH

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

³ TECOM LLC
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the thyristor voltage regulator (TVR) development. The TVR purpose is to power flows control and voltage regulate in 6-20 kV power distribution networks (PDN). The principle of TVR operation is based on the positive or negative EMF introduction into power line when the shared use of longitudinal (change the magnitude) and transverse (change the phase) voltage regulation. The description of the TVR prototype is given. TVR prototype consists of a 0.4 kV thyristor switches, power transformers (shunt and serial) and a 6 kV switchgear. The TVR prototype control system (CS) is two-level. The first level control system (CS 1) provides TVR pulse-phase regulation according to the algorithm of two-zone alternate control developed by the authors. Second level CS (CS 2) performs the functions of centralized control and monitoring with the development of control commands for CS 1. The TVR prototype research was conducted in four stages: check of power equipment, CS 1 and CS 2 research, TVR prototype tests as a whole. The connection diagrams and contact connections reliability were checked when the power part testing. It is found that the thyristor control pulses are formed according to the developed algorithm when the CS 1 testing. The correctness of control system algorithms, executed and transmitted commands, transmitted and received data was confirmed as a result of the CS 2 tests. The TVR research results indicate that the prototype provides smoothness and specified accuracy of voltage regulation in all modes. The control range of the output voltage relative to the input was $\pm 10\%$. The discreteness of regulation does not exceed 1.5% . The range of change in the shift angle of the output voltage relative to the input is $\pm 5^\circ$. Research confirmed the TVR prototype operability and its readiness for trial operation.

Keywords: control system, energy internet, prototype, power flow control, research tests, thyristor voltage regulator.

References

- [1] H. Hua and J. Cao, "Towards intelligent energy control and optimization in energy Internet: A review", in *proc. 2019 IEEE International Conference on Energy Inter-*

- net (ICEI), May 27-31, 2019, Nanjing, China, pp. 573-578. DOI: 10.1109/ICEI.2019.00107.
- [2] L. Cheng, N. Qi, F. Zhang, H. Kong and X. Huang, "Energy Internet: Concept and practice exploration", in proc. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Nov. 26-28, 2017, Beijing, China, pp.1-5. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245533.
- [3] V.A. Naumov and V.A. Matison, "From the automated power industry to the internet of energy", *Energy of Unified Grid*, vol. 2, no. 44, pp. 36-44, Apr.-May 2019.
- [4] N. Sakib, E. Hossain and S.I. Ahamed, "A qualitative study on the United States internet of energy: a step towards computational sustainability", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69003-69037, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986317.
- [5] A.B. Loskutov, "Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies", *Smart Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 9-27, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9.
- [6] N.I. Voropay, M.V. Goubko, S.P. Kovalyov, L.V. Massel, D.A. Novikov, A.N. Raikov, S.M. Senderov and V.A. Stennikov, "Digital energy development problems in Russia", *Control Sciences*, vol. 1, pp. 2-14, 2019. DOI: 10.25728/pu.2019.1.1.
- [7] F.V. Veselov and V.V. Dorofeev, "Smart grid of Russia as a new stage of power engineering development under conditions of digital economy", *Energy Policy*, vol. 5, pp. 43-52, 2018.
- [8] K. Rakhi, Prema and R. Chitrangada, "Modelling of UPFC (Unified Power Flow Control) to improve stability of power system by real and reactive power control of transmission line", in: *Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 442, Konkani A., Bera R., Paul S., Singapore: Springer, 2017, pp. 647-655. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6_62.
- [9] N.A. Hussein, A.A. Eisa, H.M. Mahmoud, S.A. Shehata and E.A. Othman, "Inter-line power flow controller (IPFC) characterization in power systems", *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 1656-1665, 2018. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.14894.
- [10] P.P. Kumbhare, A.A. Nimje and P.R. Sawarkar, "Application of distributed static series compensator for improvement of power system stability", in *Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 718, Mishra A., Basu A., Tyagi V., Singapore: Springer, 2018, pp. 27-34. DOI: 10.1007/978-981-10-7656-5_4.
- [11] A.V. Hardas, V. Rajderkar, D.V.K. Chandrakar and V.D. Hardas, "Optimum location of thyristor controlled phase angle regulator based on performance index", in proc. *2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*, June 12-13, 2018, Nagpur, India, pp. 132-136. DOI: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536084.
- [12] P. Kathal and A. Bhandakkar, "Power flow control in power system using FACT device thyristor controlled series capacitor (TCSC): A review", *International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE)*, vol. 1, no. 3, pp. 82-91, Feb.-March 2013.
- [13] D. Ranamuka, A.P. Agalgaonkar and K.M. Muttaqi, "Online coordinated voltage control in distribution systems subjected to structural changes and DG availability",

- IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 617-628, Apr. 2014. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2277719.
- [14] J.O. Petintin and M. Shaaban, "Voltage regulation in a smart distribution system incorporating variable renewable generation", in proc. *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, May 20-23, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 583-588. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873857.
- [15] Y. Bot and A. Allali, "Using DGUPFC to control the voltage of multi-feeder smart distribution system", *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, no. 4, pp. 1656-1662, 2017.
- [16] Y. Bot and A. Allali, "Using D-UPFC in voltage regulation of future distribution systems", *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 5, no. 2, pp. 581-585, 2015.
- [17] S. Wang, S. Chen, L. Ge and L. Wu, "Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1111-1123, July 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2529627.
- [18] R. Yan, Y. Li, T. K. Saha, L. Wang and M. I. Hossain, "Modeling and analysis of open-delta step voltage regulators for unbalanced distribution network with photovoltaic power generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2224-2234, May 2018. DOI: 10.1109/TSG.2016.2609440.
- [19] P. V. Pullawar, S. R. Paraskar and S. S. Jadhao, "Voltage sag mitigation in real time using booster transformer", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 164-168, June 2015.
- [20] E. Sosnina, A. Asabin, A. Kralin and E. Kryukov, "Voltage control with thyristor-regulated booster transformer", in proc. *2018 International Conf. on Smart Grid (icSmartGrid)*, Dec. 4-6, 2018, Nagasaki, Japan, 2019. pp. 202-207. DOI: 10.1109/ISGWCP.2018.8634477.
- [21] A.A. Asabin, I.V. Belyanin, E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov and E.V. Kryukov, "Control system of thyristor voltage regulator", *Smart Electrical Engineering*, vol. 1, no. 9, pp. 25-39, 2020. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_1_25.
- [22] A.A. Asabin, "Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора [Method of controlling transformer thyristor voltage regulator]", Patent RU 2398342, Aug. 27, 2010 (in Russian).
- [23] E. Sosnina, R. Bedretdinov, E. Kryukov and A. Smirnov, "Active-adaptive control system of the thyristor voltage regulator", in proc. *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, May 21-24, 2019, Chengdu, China, pp. 1165-1169. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881770.2019.

Поступила в редакцию 21.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_27

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Л.Е. Веселов

О ПРИМЕНЕНИИ ТОТЭ НА БИОГАЗЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Проанализировано обеспечение энергетической и экологической безопасности сельскохозяйственных предприятий (СХП). Рассмотрены особенности электроснабжения СХП России и возможность применения топливных элементов, работающих на биогазе из переработанных отходов сельхозпроизводства в качестве дополнительного источника энергии. Показано преимущество твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). В качестве основной проблемы интеграции ТОТЭ в систему электроснабжения (СЭС) СХП обозначена низкая маневренность установок, предложен способ ее решения. Приведена структурная схема централизованной СЭС животноводческого СХП в составе с ТОТЭ на биогазе. Разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ТОТЭ, учитывающий комплексные затраты на энергоснабжение СХП с учетом дисконтирования. Для реализации алгоритма создана база данных по ТОТЭ. На примере животноводческого предприятия на 2000 голов крупного рогатого скота проведено исследование эффективности интеграции ТОТЭ в централизованную СЭС СХП. Установлена зависимость комплексных затрат на энергоснабжение СХП от мощности ТОТЭ.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, оптимальная мощность, алгоритм выбора, биогаз, сельскохозяйственное предприятие, система электроснабжения.

1. Введение

Сельское хозяйство – важнейшая отрасль экономики России, обеспечивающая население страны продовольствием, а легкую промышленность – сырьем. По объему производства сельскохозяйственной продукции ведущими отраслями являются растениеводство и животноводство.

Введение антироссийских санкций позитивно отразилось на развитии сельского хозяйства. Распоряжением Минсельхоза России № 24р от 27.03.2015 был утвержден перечень инвестиционных проектов, направленных на поддержку импортозамещающих производств, в том числе – строительство и модернизацию теплиц, овощехранилищ, проекты по мо-

лочному и мясному скотоводству, свиноводству, птицеводству и др. [1]. По оценке Росстата [2], за последние 10 лет объем произведенной сельхозпродукции вырос в 2,4 раза, составив в 2019 г. около 6 трлн руб. Однако, по мере насыщения рынка производители все больше сталкиваются с необходимостью повышения операционной эффективности работы, улучшения качества и конкурентоспособности продукции. В настоящее время в развитии агропромышленного комплекса обозначились две основные проблемы: источники энергии для строительства новых объектов и автоматизации производств и утилизация отходов сельхозпроизводства.

Действующие СХП, подключенные к централизованной электрической сети, отличаются низкой энергетической безопасностью, что связано с частыми нарушениями электроснабжения и низким качеством поставляемой электроэнергии. Основными факторами риска являются высокий физический износ электрооборудования и низкая пропускная способность распределительных электрических сетей, что ведет к частым аварийным отключениям, среднее время которых составляет более 100 часов в год [3]. Основная экологическая проблема СХП связана с постоянным отставанием темпов утилизации отходов сельхозпроизводства от их накопления [4].

В соответствии со Стратегией устойчивого развития сельских территорий России на период до 2030 г. и Энергетической стратегией развития России на период до 2035 г. эффективное решение этих проблем заключается в расширении использования распределенных источников электроэнергии, работающих на местном топливе из переработанных отходов сельхозпроизводства [2, 5]. Для СХП перспективно использование биогаза, характеризующегося относительно низкой себестоимостью и возможностью получения из отходов сельскохозяйственного производства.

Биогаз в качестве топлива успешно применяется в газопоршневых и газотурбинных установках. Однако инновационное направление повышения эффективности и экологичности источников распределенной генерации связано с топливными элементами. ТОТЭ, способными работать на биогазе, по сравнению с традиционными энергоустановками будут отличаться более высоким КПД (электрический КПД до 60 %), отсутствием загрязняющих выбросов в атмосферу, возможностью наращивания мощности за счет модульной конструкции, долговечностью, минимальным обслуживанием [6].

Широкому использованию ТОТЭ препятствует низкая маневренность и дороговизна энергоустановок. Проблема низкой маневренности, затрудняющей совмещение суточных графиков генерации и нагрузки потребителей, может быть решена путем комбинирования ТОТЭ с другими источниками электроэнергии в составе СЭС СХП. Одновременно при интеграции в СЭС СХП возникает задача выбора оптимальной мощности

ТОТЭ [7]. Так, с увеличением доли генерации ТОТЭ увеличивается количество электроэнергии, полученной СХП от собственного экологичного источника, однако вместе с этим растут и капитальные затраты на электроснабжение. Кроме того, при выборе мощности энергоустановки по пиковой нагрузке СХП часть выработанной ТОТЭ электроэнергии не будет востребована в часы минимальной нагрузки. Все это будет снижать экономическую эффективность проектов.

Источники энергии на основе топливных элементов в отечественных и зарубежных научных публикациях представлены достаточно широко. Научные исследования посвящены изучению свойств материалов и конструкций ТОТЭ [8, 9], улучшению технических характеристик элементов [10, 11], снижению рабочей температуры [12, 13], моделированию внутренних процессов преобразования энергии [14, 15]. Однако обоснованные методические рекомендации по оптимальной интеграции ТОТЭ в системы централизованного электроснабжения потребителей пока представлены слабо.

Цель настоящего исследования – разработка алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе и оценке эффективности применения ТОТЭ в СЭС СХП, подключенного к централизованной электрической сети.

II. Краткая характеристика централизованных СЭС СХП

В сельскохозяйственной отрасли основная доля электропотребления приходится на животноводческие СХП, наиболее энергозатратными среди которых являются предприятия по производству молока, мяса, птицы [16].

В зависимости от суммарной установленной мощности электроприемников (ЭП) можно выделить: крупные (> 5 МВт) СХП, средние (1–5 МВт) СХП и СХП малой мощности (< 1 МВт). Известно, что число уровней централизованных СЭС СХП варьируется от трех (малые СХП) до шести (крупные СХП). В состав СЭС малых и средних СХП входят трансформаторные подстанции (ТП) 6(10)/0,4 кВ, магистральные (ЩМ) и распределительные щиты (ЩР) 0,4 кВ, распределительные электрические сети 0,38 кВ, электроприемники (рис. 1). К крупным ЭП относят насосы, транспортеры и смесители с напряжением питания ЭП 0,4 кВ [17].

Проблемы низкой энергетической и экологической безопасности СХП могут быть решены путем использования отходов сельхозпроизводства в качестве топлива для местных энергоустановок, являющихся дополнительным источником энергии и обеспечивающих как бесперебойное электроснабжение СХП, так и решающих проблемы утилизации.

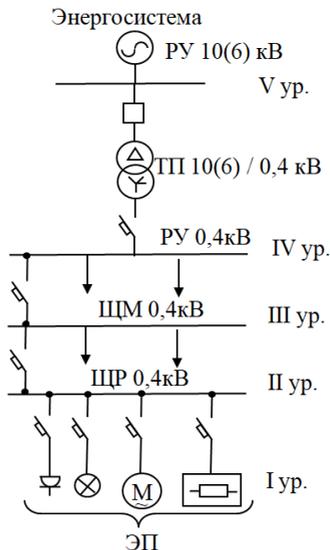


Рис. 1. Уровни СЭС среднего СХП

III. Применение ТОТЭ на биогазе в СЭС СХП

Биогаз – наиболее перспективная форма конвертации отходов в электроэнергию [18]. Результаты сравнительного анализа энергоустановок (ЭУ), работающих на биогазе (ГТУ), газопоршневых (ГПУ), парогазовых (ПГУ) энергоустановок и электрохимических генераторов на основе топливных элементов (ТЭ), приведены в табл. 1. Эти результаты показывают преимущество ТЭ.

Таблица 1.

Сравнительный анализ энергоустановок

Характеристика	ГТУ	ГПУ	ПГУ	ТЭ
Электрический КПД первичного двигателя, %	25–35	40–45	38	50–55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70–92	75–80	до 95
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г/кВт·ч	300–615	360–610	297–370	210–340

Проведен анализ ТЭ по критерию применимости в СЭС СХП. Установлено, что использование биогаза как топлива наиболее эффективно для высокотемпературных ТОТЭ. ТОТЭ не требовательны к качеству топлива и не нуждаются в дорогом катализаторе (платина).

Для оценки возможности использования ТОТЭ в СЭС СХП разработана база данных по ТОТЭ [19]. База данных содержит информацию о технических характеристиках, энергетических параметрах и стоимости ТОТЭ с различной установленной мощностью более чем по 100 моделям ЭУ различных компаний-производителей. Структура базы данных представлена на рис. 2.

Энергоустановки на основе ТОТЭ					
Природный газ (СН4)	Биогаз (СН4)	Синтез-Газ (СО + Н2)	Водород (Н2)	Борогидрид Натрия (NaBH4)	Метанол (СН3ОН)
Производители (15 стран, включая Россию)					
Модели (> 100 моделей)					
Номинальная электрическая мощность (от 0,1 до 3700 кВт)					
Стоимость (\$)					
Эксплуатационно-технологические и экономические параметры (32 параметра)					
1 КПД электрич.	1 КПД электрич.	1 КПД электрич.	1 КПД электрич.	1 КПД электрич.	1 КПД электрич.
2 КПД тепловой	2 КПД тепловой	2 КПД тепловой	2 КПД тепловой	2 КПД тепловой	2 КПД тепловой
3 Тип конструкции	3 Тип конструкции	3 Тип конструкции	3 Тип конструкции	3 Тип конструкции	3 Тип конструкции
4 Тип тока	4 Тип тока	4 Тип тока	4 Тип тока	4 Тип тока	4 Тип тока
5 Температура	5 Температура	5 Температура	5 Температура	5 Температура	5 Температура
6 Ресурс (ч)	6 Ресурс (ч)	6 Ресурс (ч)	6 Ресурс (ч)	6 Ресурс (ч)	6 Ресурс (ч)
7 Расход топлива	7 Расход топлива	7 Расход топлива	7 Расход топлива	7 Расход топлива	7 Расход топлива
8 Время разогрева	8 Время разогрева	8 Время разогрева	8 Время разогрева	8 Время разогрева	8 Время разогрева
9 Масса и др.	9 Масса и др.	9 Масса и др.	9 Масса и др.	9 Масса и др.	9 Масса и др.

Рис. 2. Структура базы данных по ТОТЭ

База данных позволяет проводить систематизацию по 32 параметрам, в том числе, по величине номинальной мощности энергоустановки, КПД, типу топлива, стоимости и др. Выдача и обработка информации реализована в системе управления базами данных *MySQL Workbench 8.0 CE*, язык программирования *SOL:2008*.

Проведенный с помощью разработанной базы данных анализ показал целесообразность интеграции ТОТЭ на биогазе в СЭС СХП малой и средней мощности. Для дальнейшего исследования эффективности применения ТОТЭ рассмотрен вариант интеграции ЭУ на ТОТЭ в централизованную СЭС СХП.

IV. Разработка алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе для интеграции в централизованную СЭС СХП

На рис. 3 представлен пример структурной блок-схемы централизованной СЭС животноводческого комплекса. Электроснабжение СХП осуществляется от централизованной электрической сети и собственного источника энергии, которым является ЭУ на ТОТЭ, работающая на биогазе.

Биогаз производится из отходов крупного рогатого скота (КРС). Проведен анализ режимов работы рассматриваемой СЭС. При минимальной нагрузке СХП ЭУ на ТОТЭ будет основным источником электроэнергии.

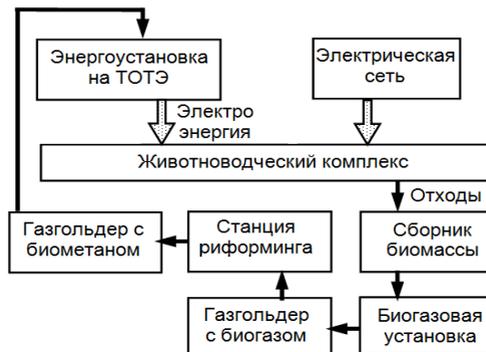


Рис. 3. Структурная блок-схема СЭС СХП с ТОТЭ на биогазе

В период максимальной нагрузки СХП получает дополнительную электроэнергию из электрической сети:

$$P_j = P_{\text{тотэ}} + P_{\text{сэ}}, \quad (1)$$

где P_j – электрическая нагрузка СХП в j -й момент времени (кВт); $P_{\text{тотэ}}$ – электрическая мощность, потребляемая от ТОТЭ (кВт); $P_{\text{сэ}}$ – электрическая мощность, потребляемая от централизованной электрической сети.

В период минимальной нагрузки предусмотрена передача излишков генерации (ΔP_j) от ТОТЭ в электрическую сеть через ТП [20]:

$$\Delta P_j = P_{\text{тотэ}} - P_j. \quad (2)$$

При выборе оптимальной мощности ТОТЭ критерием оптимизации являются комплексные затраты на энергоснабжение СХП за расчетный период:

$$C_{\Sigma i} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{кап}} + C_{\text{тех}} + C_{\text{рп}} + C_{\text{сэ}} + C_{\text{ст}} - C_{\text{дс}}), \quad (3)$$

где n – конечный год расчетного периода; $C_{\text{кап}}$ – капитальные затраты на ЭУ на ТОТЭ; $C_{\text{тех}}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт ЭУ на ТОТЭ; $C_{\text{рп}}$ – затраты на рабочий персонал; $C_{\text{сэ}}$ – затраты на покупку электроэнергии от электрической сети; $C_{\text{ст}}$ – затраты на покупку тепловой

энергии от котельной; $C_{ДС}$ – прибыль от продажи излишков генерации от ТОТЭ в электрическую сеть.

Оптимизационным параметром является номинальная мощность ТОТЭ ($P_{НОМ}$). Задача оптимизации заключается в поиске $P_{НОМ}$, при которой $C_{\Sigma} \rightarrow \min$. Разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе для интеграции в централизованную СЭС СХП, блок-схема которого представлена на рис. 4. Выбор оптимальной мощности ТОТЭ основан на определении минимума целевой функции путем имитации работы СЭС СХП на протяжении расчетного периода при использовании различных ЭУ на ТОТЭ, номинальные мощности которых находятся в границах оптимизации.

Поясним основные элементы блок-схемы. В *Блоке исходных данных* задается количество лет в расчетном периоде, параметры СХП, информация об энергоносителях и тарифах. *Блок поиска границ оптимизации* используется для определения минимально возможной ($P_{МИН}$) и максимально допустимой ($P_{МАКС}$) мощности ТОТЭ:

$P_{МИН}$ принимается равной минимальной электрической нагрузке СХП в нормальном режиме работы. $P_{МАКС}$ рассчитывается с учетом суточного объема производства биогаза:

$$P_{МАКС} = V_m / (F_{ТОТЭ} \cdot t_{ТОТЭ}), \quad (4)$$

где V_m – суточный объем производства биогаза, зависящий от количества КРС; $F_{ТОТЭ}$ – удельный расход биогаза на выработку 1 кВт·ч электроэнергии ($\text{м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$); $t_{ТОТЭ}$ – время работы ТОТЭ в сутках (ч).

Далее из *Информационной базы данных* выбираются N ЭУ на ТОТЭ, значения $P_{НОМ}$ которых находятся в диапазоне:

$$P_{МИН} \leq P_{НОМ} \leq P_{МАКС}. \quad (5)$$

Запускается цикл из N вычислений энергетических и экономических показателей СЭС СХП за расчетный период.

С помощью *Блоков вычислений электрической и тепловой энергии* для каждой k -й ЭУ на ТОТЭ из N выбранных определяются составляющие электрической и тепловой энергии за каждый i -й год расчетного периода:

- $W_{ТОТЭi}^k$ – электроэнергия, потребляемая СХП от ТОТЭ (кВт·ч);
- $W_{СИ}^k$ – электроэнергия, потребляемая СХП от сети (кВт·ч);
- $W_{ПСi}^k$ – электроэнергия от ТОТЭ, продаваемая в сеть (кВт·ч);
- $Q_{ТОТЭi}^k$ – тепловая энергия, потребляемая СХП от ТОТЭ (Гкал);
- $Q_{Ки}^k$ – тепловая энергия, потребляемая СХП от котельной (Гкал).



Рис. 4. Блок-схема алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе

Для расчета составляющих электрической и тепловой энергии каждый i -й год расчетного периода разделяется на j -е интервалы времени. Значения $W_{\text{ТОТЭ}i}^k$, $W_{\text{С}i}^k$, $W_{\text{ПС}i}^k$, $Q_{\text{ТОТЭ}i}^k$ и $Q_{\text{К}i}^k$ определяются путем распределения электрической и тепловой нагрузки СХП между источниками для каждого j -го интервала времени в течение всего расчетного периода. При этом учитываются перерывы на плановое обслуживание и ремонт.

В Блоке вычислений комплексных затрат для каждой k -й ЭУ на ТОТЭ из N выбранных рассчитываются составляющие комплексных затрат за каждый i -й год и весь расчетный период:

$$C_{\text{СЭ}i} = T_{\text{С}} \cdot W_{\text{С}i}^k; \quad (6)$$

$$C_{\text{ДС}i} = T_{\text{ТОТЭ}} \cdot W_{\text{ПС}i}^k; \quad (7)$$

$$C_{\text{СТ}i} = T_{\text{К}} \cdot Q_{\text{К}i}^k / (Q_{\text{К,МИН}} \cdot \eta_{\text{К}}), \quad (8)$$

где $T_{\text{С}}$ – тариф на электроэнергию, потребляемую от сети (руб/кВт·ч); $T_{\text{ТОТЭ}}$ – тариф на электроэнергию от ТОТЭ, продаваемую в сеть (руб/кВт·ч); $T_{\text{К}}$ – тариф на котельное топливо; $\eta_{\text{К}}$ – КПД котельной.

Особенностью ТОТЭ является высокая стоимость. При этом капитальные затраты относятся к первому году расчетного периода, а экономия за счет использования ТОТЭ, которая должна обеспечить возврат капитальных вложений, приходится на последующие годы. Поэтому, чтобы привести разновременные денежные потоки в сопоставимый вид к одному моменту времени, кроме C_{Σ} расчет комплексных затрат проводится с учетом дисконтирования ($C_{дс}$):

$$C_{дс} = \sum C_{дi} = \sum [C_i \cdot (1+r)^{-t}], \quad (9)$$

где r – ставка дисконтирования; t – количество лет до момента приведения.

В Блоке построения целевой функции сохраняются N результатов вычислений C_{Σ} и $C_{дс}$ и формируются целевые функция $C_{\Sigma}=f(P_{ном})$ и $C_{дс}=f(P_{ном})$. Оптимальное значение $P_{ном}$ определяется путем перебора и сравнения вариантов затрат на энергоснабжение.

V. Результаты исследования эффективности применения ТОТЭ на биогазе в составе централизованной системы электроснабжения СХП

В соответствии с разработанным алгоритмом в приложении Excel составлена компьютерная программа и проведено исследование эффективности применения ТОТЭ в централизованной СЭС животноводческого СХП. Структура исследуемой СЭС соответствует блок-схеме на рис. 3. Выполнен сравнительный анализ недисконтированных (C_{Σ}) и дисконтированных ($C_{дс}$) комплексных затрат для трех вариантов работы централизованной СЭС. Вариант 1 – энергоснабжение СХП от электрической сети и котельной без ТОТЭ. Вариант 2 – энергоснабжение СХП от ТОТЭ, электрической сети и котельной, излишки электроэнергии от ТОТЭ могут быть переданы в централизованную электрическую сеть и вариант 3 – энергоснабжение от ТОТЭ, электрической сети и котельной, излишки электроэнергии от ТОТЭ не передаются в централизованную электрическую сеть.

С учетом границ оптимизации $P_{ном}$ для сравнительного анализа из базы данных выбраны пять ($N = 5$) ЭУ на ТОТЭ, номинальные мощности которых составляют: $P_{ном1} = 100$ кВт, $P_{ном2} = 200$ кВт, $P_{ном3} = 300$ кВт, $P_{ном4} = 400$ кВт, $P_{ном5} = 500$ кВт. Электрический КПД выбранных энергоустановок на ТОТЭ составляет 53-65 %. Задача состоит в выборе оптимальной мощности ЭУ на ТОТЭ.

На рис. 5 представлены результаты расчета комплексных затрат при интеграции каждой из пяти ЭУ на ТОТЭ в централизованную СЭС СХП.

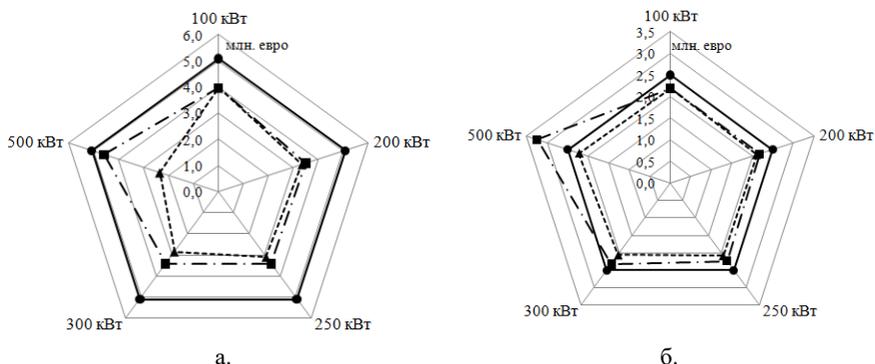


Рис. 5. Комплексные затраты на энергоснабжение:

а – недисконтированные затраты; б – дисконтированные затраты;

— работа СЭС по варианту № 1; работа СЭС по варианту № 2;

— · — работа СЭС по варианту № 3

Проведенные исследования показали, что при интеграции ТОТЭ в СЭС СХП (варианты 2 и 3) недисконтированные и дисконтированные комплексные затраты на энергоснабжение СХП (для большинства ЭУ на ТОТЭ) будут меньше соответствующих затрат при электроснабжении СХП только от ТП (вариант 1). Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность применения ТОТЭ в централизованных СЭС СХП.

Диаграммы на рис. 5а и 5б, показывающие зависимость недисконтированных и дисконтированных комплексных затрат на энергоснабжение предприятия от мощности ТОТЭ, различаются. Так, если посмотреть на недисконтированные затраты для варианта 2, то оптимальным является использование ТОТЭ с $P_{\text{ном}} = 500$ кВт. Однако, при использовании ТОТЭ такой мощности, дисконтированные затраты будут наибольшими. Это объясняется слишком большими капитальными затратами в 1-й год проекта. С учетом ставки дисконтирования более эффективным является использование ТОТЭ меньшей мощности ($P_{\text{ном}} = 200, 250$ или 300 кВт).

VI. Заключение

Проблемы низкой энергетической и экологической безопасности СХП могут быть решены путем утилизации отходов сельскохозяйственного производства при получении биогаза в качестве топлива для ЭУ на ТОТЭ, являющихся дополнительным источником энергии и обеспечивающих бесперебойное электроснабжение СХП. Основные результаты работы:

- создана информационная база данных по ЭУ на ТОТЭ, содержащая систематизированную и структурированную информацию о характе-

- ристиках более 100 моделей ТОТЭ различных компаний-производителей.
- разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ЭУ на ТОТЭ при интеграции в централизованную СЭС СХП. Алгоритм позволяет на этапе проектирования определить мощность ТОТЭ, соответствующую минимальным комплексным затратам на энергоснабжение с учетом дисконтирования.
 - на примере животноводческого комплекса на 2000 голов КРС по разработанному алгоритму проведено исследование эффективности интеграции ТОТЭ в централизованную СЭС. Установлено, что при использовании ТОТЭ комплексные затраты на энергоснабжение СХП будут меньше соответствующих затрат при питании СХП только от ТП, что свидетельствует о привлекательности применения ЭУ на ТОТЭ в системах электроснабжения СХП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение о предоставлении грантов для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук № 075-15-2020-097 (МК-593.2020.8) от 18.03.2020 г.)

© Соснина Е.Н., 2020

© Шалухо А.В., 2020

© Веселов Л.Е., 2020

Библиографический список

- [1] Сельское хозяйство регионов России // Экспертно-аналитический центр агробизнеса [Электронный ресурс]. URL: <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-regionov-rossii> (дата обращения 01.10.2020).
- [2] Стратегия устойчивого развития сельских территорий России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 февраля 2015 г. № 151-р.
- [3] Сафронов Р.И., Хомяков Д.С. Проблема и специфика электроснабжения сельского хозяйства // Материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Молодежная наука – гарант инновационного развития АПК», Декабрь 19–21, 2018, Курск, Россия. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия. 2019. С. 406-409.
- [4] Дашковский И. Дырявая экология. Сельское хозяйство производит 250 млн. т отходов в год // Агротехника и технологии. 2018. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/> (дата обращения 01.10.2020).
- [5] Энергетическая стратегия развития России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

- [6] BloomEnergy [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bloomenergy.com> (дата обращения 01.11.2020).
- [7] Киселев И.В. Повышение энергетической эффективности твердооксидных топливных элементов и обоснование их применения для энергоснабжения потребителей малой мощности: автореф. дисс. канд. техн. наук, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Москва. 2013. – 20 с.
- [8] Wang J., Yang T., Wen Y., Zhang Y., Sun C., Huang K. Performance and stability of $\text{SrCo}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ - $(\text{La}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})_{0.95}(\text{Co}_{0.20}\text{Fe}_{0.80})\text{O}_{3-\delta}$ bilayer cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2019. Т. 414. С. 24-30. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.12.082.
- [9] Fang W., Yang T., Huang K. In situ synthesis of a high-performance bismuth oxide based composite cathode for low temperature solid oxide fuel cells // *Chemical Communications*. 2019. № 55 (19). С. 2801–2804. DOI: 10.1039/c9cc00442d.
- [10] Pianko-Oprych P., Hosseini S.M. Dynamic analysis of load operations of two-stage SOFC stacks power generation system // *Energies*. 2017. № 10 (12). С. 2103. DOI: 10.3390/en10122103.
- [11] Kupecki J. Off-design analysis of a micro-CHP unit with solid oxide fuel cell fed by DME // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. № 40 (35). С. 12009–12022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.031.
- [12] Шарафутдинов А.У., Федотов Ю.С., Бредихин С.И. Мультифизическое моделирование батареи твердооксидных топливных элементов в приближении эффективной среды // *Химические проблемы*. 2020. № 3 (18). С. 298-314. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-3-298-314 (на английском).
- [13] Baharuddin N.A., Rahman N.F.A., Rahman H.A., Somalu M.R., Azmi M.A., Raharjo J. Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters // *International Journal of Energy Research*. 2020. Т. 44. № 11. DOI: 10.1002/er.5518.
- [14] Milewski J., Szczeńsiak A., Szablowski L. A discussion on mathematical models of proton conducting solid oxide fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Т. 44. № 21. С. 10925–10932. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.082.
- [15] Wrobel M., Brus G. Mathematical modelling of solid oxide fuel cells revisited - a modified formulation of the problem, 2019 (не опубликована).
- [16] Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации, Минэкономразвития России. Москва, 2019. – 85 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_po_energoeffektivnosti_.html (дата обращения 06.10.2020).
- [17] Филатов Д.А., Терентьев П.В. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения и электрооборудования сельскохозяйственных предприятий при изменении уровня питающего напряжения // *Вестник Нижегородской Государственной Сельскохозяйственной Академии*. 2016. № 3 (11). С. 57-62.
- [18] Электроэнергия из биогаза и применение биогазовой технологии // Биоконкомплекс [Электронный ресурс]. URL: <http://biogaz-russia.ru> (дата обращения 06.10.2020).

- [19] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е. База данных по твердооксидным топливным элементам (ТОТЭ), Свидетельство о гос. рег. 2020622076; заявл. 21.10.20; опубл. 28.10.20.
- [20] Федеральный закон Российской Федерации «Об электроэнергетике» от 26 марта 2003 г. N 35-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, L.E. Veselov

APPLICATION OF SOFCs ON BIOGAS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

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

Abstract. One of the main conditions for the country's stability is the creation of an effective agro-industrial complex. The article is devoted to ensuring energy and environmental safety of agricultural enterprises. The features of Russian agricultural enterprises power supply have been considered as well as the possibility of using fuel cells powered by biogas from recycled agricultural waste as an additional energy source. The advantage of solid oxide fuel cells (SOFCs) is shown. The main problem of SOFCs integration into power supply systems for agricultural enterprises, that is their low maneuverability, was noted. The method of its solution was proposed. A block diagram of the centralized power supply system for the livestock agricultural enterprise with the SOFCs on biogas was presented. An algorithm for selecting the optimal SOFCs power was developed taking into account the total discounted costs of agricultural enterprise's energy supply. To implement the algorithm, a SOFCs database was also created. On the example of the livestock enterprise with 2000 heads of cattle, a study of the effectiveness SOFCs integration into the centralized power supply system for an agricultural enterprise was conducted. The dependence of the total costs of agricultural enterprise's energy supply on the SOFCs power was established.

Keywords: agricultural enterprise, biogas, database, power supply system, solid oxide fuel cell.

References

- [1] Sel'skoe hozyajstvo regionov Rossii [Agriculture of Russian regions]. [Online]. Available at: <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-regionov-rossii> [Accessed: Oct. 1, 2020] (in Russian).
- [2] Strategiya ustoychivogo razvitiia selskikh territorii Rossii na period do 2030 goda [Strategy for sustainable development of rural areas of Russia for the period up to 2030]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation no. 151-r dated Feb. 2, 2015 (in Russian).

- [3] R.I. Safronov and D.S. Khomyakov, “*Problema i spetsifika elektrosnabzheniia selskogo khoziaistva [The problem and specifics of electricity supply in agriculture]*”, in proc. X All-Russia (national) scient.-pract. conf. “*Molodezhnaya nauka - garant innovacionnogo razvitiya APK [Youth science is the guarantor of innovative development of the agro-industrial complex]*”, Dec. 19-21, 2018, Kursk, Russia. Kursk State Agricultural Academy, pp. 406-409, 2019 (in Russian).
- [4] I. Dashkovskiy. “*Dyriavaia ekologiia. Selskoe khoziaistvo proizvodit 250 mln. t ot-khodov v god [Leaky ecology. Agriculture produces 250 million tons of waste per year]*”, *Agrotekhnika i Tekhnologii [Agriculture and technology]*, no. 2, March-Apr. 2018 [Online]. Available at: <https://www.agroinvestor.ru/> (in Russian).
- [5] Energeticheskaia strategiia razvitiia Rossii na period do 2035 goda [Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation no. 1523-r dated June 9, 2020 (in Russian).
- [6] Bloom Energy. Available at: <https://www.bloomenergy.com> [Accessed: Nov. 1, 2020] (in Russian).
- [7] I.V. Kiselev, “*Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tverdotsidnykh toplivnykh elementov i obosnovanie ih primeneniia dlia energosnabzheniia potrebiteli maloi moshchnosti [Improving the energy efficiency of solid oxide fuel cells and justifying their use for power supply of low-power consumers]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Russian Federal Nuclear Center, Moscow, 2013 (in Russian).
- [8] J. Wang, T. Yang, Y. Wen, Y. Zhang, C. Sun and K. Huang, “Performance and stability of $\text{SrCo}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}-(\text{La}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})_{0.95}(\text{Co}_{0.20}\text{Fe}_{0.80})\text{O}_{3-\delta}$ bilayer cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol. 414, pp. 24–30, Feb. 2019. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.12.082.
- [9] W. Fang, T. Yang and K. Huang, “In situ synthesis of a high-performance bismuth oxide based composite cathode for low temperature solid oxide fuel cells”, *Chemical Communications*, no. 55 (19), pp. 2801–2804, Feb. 2019. DOI: 10.1039/c9cc00442d.
- [10] P. Pianko-Oprych and S.M. Hosseini, “Dynamic analysis of load operations of two-stage SOFC stacks power generation system”, *Energies*, no 10(12). pp. 2103, Dec. 2017. DOI: 10.3390/en10122103.
- [11] J. Kupecki, “Off-design analysis of a micro-CHP unit with solid oxide fuel cell fed by DME”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, is. 35, pp. 12009–12022, Sept. 2015. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.031.
- [12] A.U. Sharafutdinov, Yu.S. Fedotov and S.I. Bredikhin, “Solid oxide fuel cell stack simulation using effective medium approximation”, *Chemical problems*, vol. 18, no. 3, pp. 298-314, 2020. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-3-298-314.
- [13] N.A. Baharuddin, N.F.A. Rahman, H.A. Rahman, M.R. Somalu, M.A. Azmi and J. Raharjo, “Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters”, *International Journal of Energy Research*, vol. 44, is. 11, Sept. 2020. DOI: 10.1002/er.5518.
- [14] J. Milewski, A. Szczęśniak and L. Szablowski, “A discussion on mathematical models of proton conducting solid oxide fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 21, pp. 10925–10932, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.082.

-
- [15] M. Wrobel and G. Brus, “Mathematical modelling of solid oxide fuel cells revisited - a modified formulation of the problem», Jan. 2019 (preprint submitted to *Applied Energy*).
- [16] Gosudarstvennyi doklad o sostoianii energosberezheniia i povyshenii energeticheskoi effektivnosti v Rossiiskoi Federatsii [State Report on the State of Energy Saving and Energy Efficiency Improvement in the Russian Federation]. Moscow, 2019. [Online]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvenny_doklad_po_energoeffektivnosti_.html [Accessed: Oct. 06, 2020] (in Russian).
- [17] D.A. Filatov and P.V. Terentyev, “Elektromagnitnaia sovmestimost sistem elektrosnabzheniia i elektrooborudovaniia sel'skokhoziaistvennykh predpriatii pri izmenenii urovnia pitaiushchego napriazheniia [Electromagnetic compatibility of electrical supply systems and electrical equipment of agricultural enterprises when the supply voltage level changes]”, *Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, no. 3 (11), pp. 57-62, 2016 (in Russian).
- [18] *Elektroenergiia iz biogaza i primenenie biogazovoi tekhnologii [Electricity from biogas and the application of biogas technology]*. [Online]. Available at: <http://biogaz-russia.ru> [Accessed: Oct. 06, 2020] (in Russian).
- [19] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, and L.E. Veselov, “Baza dannykh po tverdotsidnym toplivnym elementam (TOTE) [Database on solid oxide fuel cells (SOFCs)]”, Certificate of state registration No. 2020622076, Oct. 28, 2020 (in Russian).
- [20] Federal Law of the Russian Federation № 35-FZ on March 26, 2003 “Ob elektroenergetike [On Electric Power Industry]” (in Russian).

Поступила в редакцию 12.10.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_42

УДК 621.316.722.9

В.Г. Сугаков, А.А. Тошев, Н.С. Варламов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВНЕШНЕЙ ФОРСИРОВКОЙ

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижегород, Россия

Приведены результаты исследования, целью которого было моделирование и анализ процессов в системе с использованием различных способов формирования напряжения внешней форсировки, рассмотрены различные системы внешней форсировки в составе имитационной модели судовой электроэнергетической системы. Представлены результаты моделирования при изменении коэффициента форсировки и мощности подключаемой нагрузки. На основе результатов моделирования определены значения переходного отклонения напряжения и длительности режимов форсировки. Выявлено, что контроль приращения напряжения позволяет улучшить качество и сократить длительность переходного процесса. Практическое значение работы определяется задачами обеспечения номинального режима работы потребителей и элементов электроэнергетической системы в целом, в частности – на объектах водного транспорта.

Ключевые слова: внешняя форсировка, имитационная модель, переходный процесс, синхронный генератор, системы возбуждения.

I. Введение

Обеспечение качества электрической энергии на объектах водного транспорта согласно требованиям [1-4] является актуальной задачей [5-7]. Качество электрической энергии в судовых электроэнергетических системах во многом зависит от системы регулирования возбуждения генератора, а значит, повышение качества регулирования возбуждения является не менее актуальной задачей [8, 9]. Применение системы автоматического регулирования возбуждения (САРВ) с использованием внешней форсировки (ВФ) – один из вариантов улучшения качества регулирования возбуждения судовых синхронных генераторов является. Он особенно актуален в случаях, когда мощность нагрузки соизмерима с мощностью источника электрической энергии [10, 11].

Исследования имитационных моделей судовых электроэнергетиче-

ских систем показали высокую эффективность применения систем с ВФ [10–12], обеспечивающих высокую форсировочную способность и высокое быстродействие. Однако в данных исследованиях не были отражены особенности работы систем с различными способами формирования напряжения форсировки. Целью настоящей работы является анализ переходных процессов, протекающих в электроэнергетической системе, при использовании разработанных систем ВФ и ВФ с контролем приращения напряжения (КПН).

II. Методы и материалы

Одним из основных показателей качества электрической энергии, характеризующих переходный процесс, является переходное отклонение напряжения. Согласно [1, 2], переходное отклонение напряжения является величиной, равной разности между действительным и установившимся значениями напряжения, и выражается в процентах от номинального значения напряжения (рис. 1).

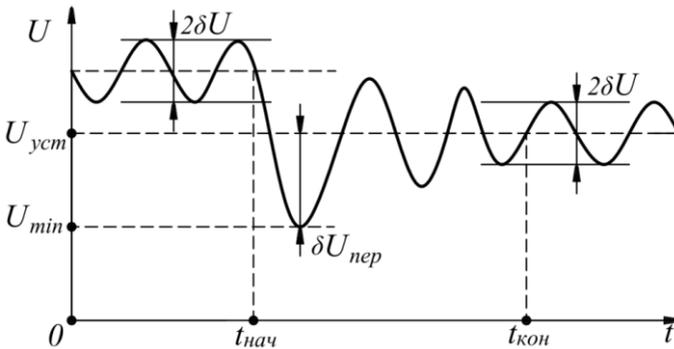


Рис. 1. Оциллограмма напряжений при набросе нагрузки

Переходное отклонение напряжения $\delta U_{\text{пер}}$ при набросе нагрузки определяется по формуле:

$$\delta U_{\text{пер}} = \frac{U_{\text{min}} - U_{\text{уст}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%,$$

где U_{min} , $U_{\text{уст}}$, $U_{\text{ном}}$ — соответственно минимальное, установившееся и номинальное значение напряжения, В.

Для анализа переходного процесса в трехфазной системе электропитания построена имитационная модель (рис. 2). Модель включает: синхронный генератор (GI) с блоками системы автоматического регулирования напряжения ($ExcitationSystem1$) и внешней форсировки (VFI),

трехфазный измеритель напряжения (*Measurement1*), блоки вычисления прямой последовательности напряжения (*Analyzer1* и *Analyzer2*), блок включения нагрузки (*Breaker1*) и нагрузок (*Load1* и *Load2*). Блок *VF1* представлен в виде подсистемы, структура которой определяется в зависимости от исследуемой схемы ВФ. Имитационные модели системы САРВ с ВФ и с ВФ и КПН и их описания более подробно приведены в работах [12, 13].

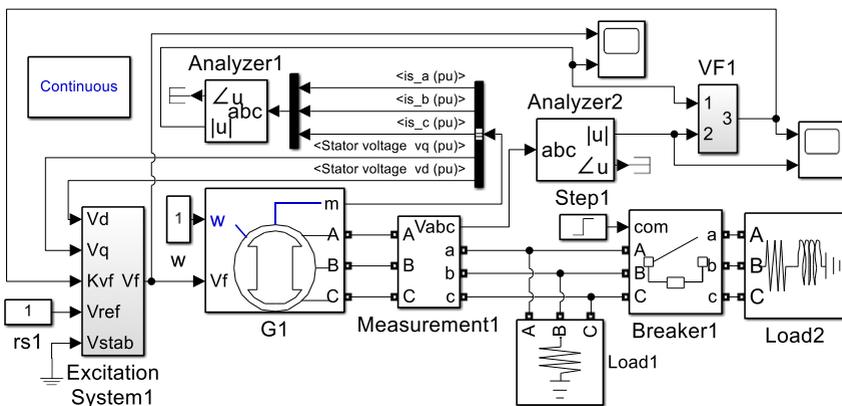


Рис. 2. Схема имитационной модели судовой системы электроснабжения

Исследование проводилось следующим образом. В имитационной модели устанавливаются заданные значения напряжения (блок *rs1*) и частоты (блок *w*). Затем ступенчато изменяют мощность нагрузки (*Step1* и *Breaker1*) и измеряют напряжение на выходе генератора.

Использовался следующий ряд значений, который задавался в блоке *VF1* коэффициента форсировки для различных систем ВФ: 0, 1, 3, 5, 7.

III. Результаты исследования

Для изучения зависимости переходного отклонения напряжения от коэффициента форсировки в САРВ с различными типами ВФ проведено исследование имитационной модели при изменении мощности подключаемой нагрузки и коэффициента форсировки.

Переходные процессы, полученные в результате исследования имитационной модели, изображены на рис. 3 и 4. Коэффициент форсировки в данном случае принимался равным 7.

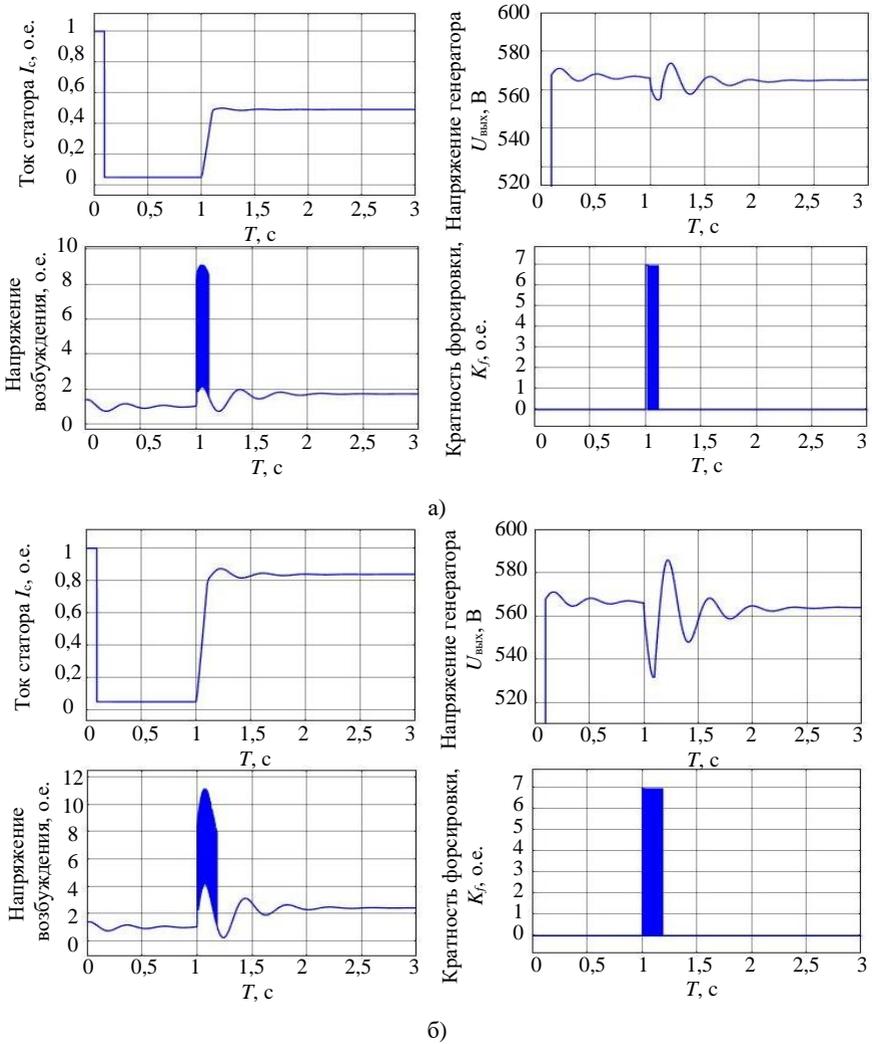


Рис. 3. Результаты математического моделирования САРВ с ВФ (при набросе нагрузки в 50 % (а) и 100 % (б) от мощности генератора)

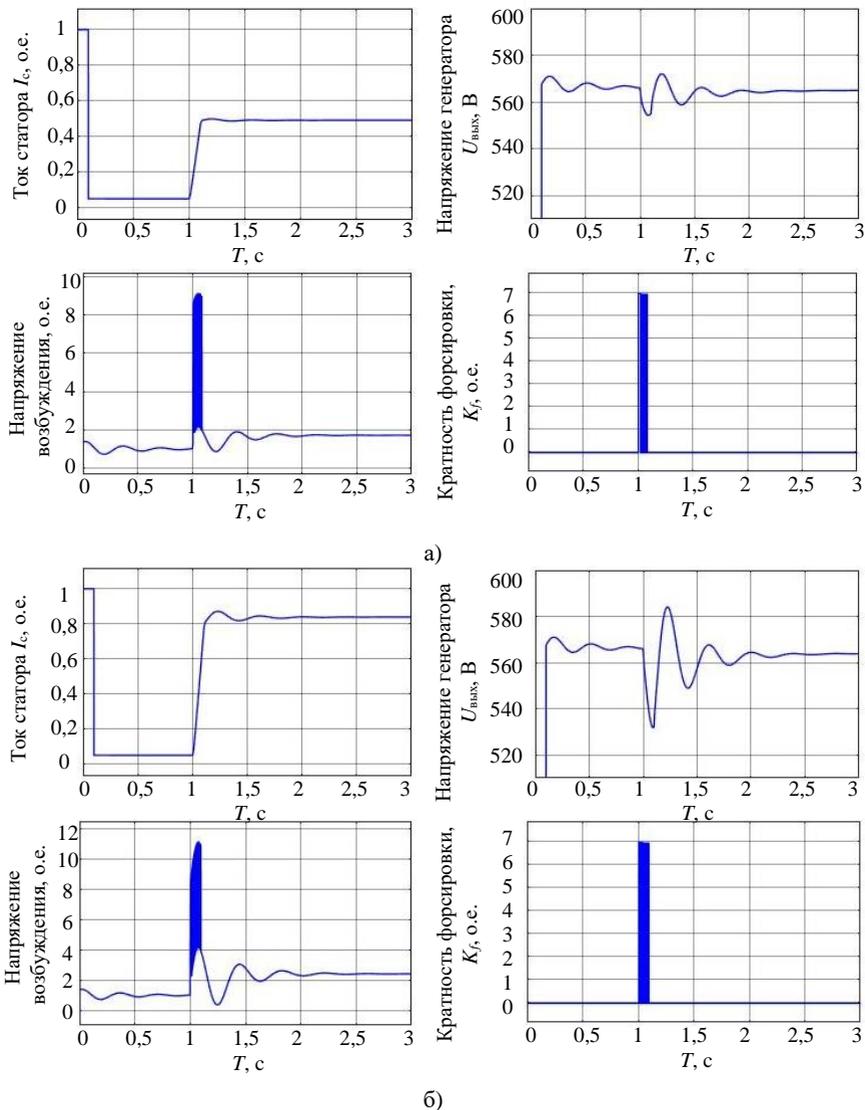


Рис. 4. Результаты математического моделирования САРВ с ВФ и КПН (при набросе нагрузки 50 % (а) и 100 % (б) от мощности генератора)

По результатам моделирования установлено, что в случае исследования САРВ с ВФ (рис. 3) значение $\delta U_{\text{пер}}$ составляет 3 % от номинального

напряжения при набросе нагрузки, мощность которой равна 50 % от мощности генератора. При мощности нагрузки, равной мощности генератора, значение $\delta U_{\text{пер}}$ увеличивается до 4,77 %. Также с увеличением мощности подключаемой нагрузки увеличивается время форсировочного режима, длительность которого увеличивается на 0,1 с.

Во втором случае, когда исследуется САРВ с ВФ и КПН (рис. 4), значение $\delta U_{\text{пер}}$ составляет 2,83 % и 4,24 % от номинального напряжения при величине мощности подключаемой нагрузки равной 50 % и 100 % от мощности синхронного генератора соответственно. Длительность форсировочного режима сокращается практически в два раза по сравнению с САРВ без использования КПН, что позволяет снизить энергопотребление системы.

Результаты исследования зависимости переходного отклонения напряжения от коэффициента форсировки на различных ступенях нагрузки для системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Значение $\delta U_{\text{пер}}$ при различных системах ВФ

Коэффициент форсировки V_f	Ступени нагрузки, в % от номинальной мощности источника электрической энергии							
	50 %		65 %		80 %		100 %	
	Переходное отклонение напряжения $\delta U_{\text{пер}}$							
	В	%	В	%	В	%	В	%
САРВ с ВФ								
0	30	5,30	39	6,89	48	8,48	58	10,25
1	28	4,95	36	6,36	43	7,60	49	8,66
3	23	4,06	27	4,77	34	6,01	38	6,71
5	19	3,36	23	4,06	29	5,12	34	6,01
7	17	3,00	18	3,18	22	3,89	27	4,77
САРВ с ВФ и КПН								
0	30	5,30	39	6,89	48	8,48	58	10,24
1	25	4,47	33	5,83	40	7,07	44	7,77
3	20	3,53	24	4,24	30	5,30	33	5,83
5	17	3,00	19	3,35	24	4,24	29	5,12
7	16	2,83	16	2,82	20	3,53	24	4,24

Из табл. 1 видно, что использование КПН в системах ВФ приводит к уменьшению значения $\delta U_{\text{пер}}$ при увеличении мощности подключаемой нагрузки или при изменении значения коэффициента форсировки V_f . При этом наибольшая эффективность наблюдается при значении $V_f = 5$ при

мощности нагрузки от 65 % до 100 % от мощности генератора. При уменьшении мощности подключаемой нагрузки ниже или равном 50 %, наибольшая эффективность наблюдается при коэффициенте $V_f = 3$.

Сопоставление данного исследования с работой [14] показало, что при подключении потребителя соизмеримого по мощности с источником электрической энергии и отсутствии ВФ (при использовании внутренних возможностей системы возбуждения) значение $\delta U_{\text{пер}}$ составляет 10,25 % (58 В). При использовании ВФ и при коэффициенте внешней форсировки равном 3, данный показатель составил 6,71 % (38 В), а при коэффициенте равном 7 – 4,77 % (27 В). Использование ВФ с КПН при коэффициенте форсировки равном 3 значение $\delta U_{\text{пер}}$ составило 5,83 % (33 В), а при коэффициенте 7 – 4,24 % или 24 В.

IV. Заключение

На основе представленных результатов исследования имитационной модели установлено, что контроль приращения напряжения в системах ВФ обеспечивает снижение значения переходного отклонения напряжения и улучшает качество переходного процесса при набросе нагрузки, мощность которой соизмерима с мощностью генераторного агрегата. Помимо этого, КПН позволяет сократить длительность форсировочного режима и улучшить энергетические характеристики системы в целом.

© Сугаков В.Г., 2020

© Тоцев А.А., 2020

© Варламов Н.С., 2020

Библиографический список

- [1] 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.
- [2] ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. Введ. 2012-07-01. М.: Стандартинформ, 2012. – 95 с.
- [3] Российский Речной Регистр. Правила (в 5 т.). Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). М.: Российский речной регистр, 2017. – 1885 с.
- [4] Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть XI. Электрическое оборудование. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 131 с.
- [5] Семенов Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения. Саратов: Профообразование, 2017. – 415 с.

-
- [6] Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах. 3-е изд. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.
- [7] Карташев, И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- [8] Лейзгольд Д.Ю., Ромодин А.В., Трушников К.П. Показатели качества электрической энергии как индикаторы эффективности управления электропотреблением // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11-7. С. 1501-1506.
- [9] Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. М.: Высшая школа, 2002. – 511 с.
- [10] Тощев А.А., Сугаков В.Г. Система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой // *Речной транспорт (XXI век)*. 2014. № 1 (66). С. 70-71.
- [11] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Тощев А.А. Система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой, Пат. 2510698 RU, заявл. 28.11.2012; опубл. 10.04.2014. – Бюл. № 10.
- [12] Сугаков В.Г., Тощев А.А. Моделирование системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой // *Труды конгресса «Великие реки-2018»*, Май 15-18, 2018, Волжский, Россия. 2018. Вып. 7. С. 1-5.
- [13] Тощев А.А., Сугаков В.Г., Зобов Л.В. Математическое моделирование системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой // *Труды Крыловского Государственного Научного Центра*. 2019. № S2. С. 205-211. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-205-211.
- [14] Сугаков В.Г., Тощев А.А., Зобов Л.В. Математическая и имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения с внешней форсировкой // *Вестник Волжской Государственной Академии Водного Транспорта*. 2019. № 58. С. 174-180.

V.G. Sugakov, A.A. Toshev, N.S. Varlamov

TRANSITION PROCESSES RESEARCH IN SHIP SYNCHRONOUS GENERATORS' EXCITATION REGULATION SYSTEMS WITH EXTERNAL FORCING

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Consumers' nominal operating mode and electric power system elements achievement as a whole is closely related to the electric power quality. Especially it is applicable to the water transport facilities, where the comparable power load connection results in the voltage dips and other negative effects as well. The voltage dips magnitude directly depends on the synchronous generator's excitation control system reaction to external influences.

It's worth mentioning that various excitation systems' technical solutions have certain drawbacks despite various their large number, for example low forcing ability and, as a consequence, the inability to directly start asynchronous motors with a squirrel-cage rotor, comparable in power to an electric energy source. The external forcing use in the current systems provides a high forcing capacity, which results in reducing the voltage dips magnitude when switching powerful electric energy consumers. This paper discusses various external forcing systems as part of the simulation model of the ship's electric power system. The research goal is to simulate and analyze the processes in the system using various methods of generating external forcing voltage.

The simulation results when changing the force coefficient and the connected load power are demonstrated. The transient voltage deviation values and the forcing modes duration are determined based on the results. It was revealed that the voltage increment control may improve the transient process quality and reduce its duration.

Keywords: excitation systems, external forcing, simulation model, synchronous generator, transient.

References

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [2] The electrical energy quality. Terms and Definitions, GOST R 54130-2010, July 2012.
- [3] Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila [Russian River Register. Rules]. Vol. 2. Pravila klassifikacii i postrojki sudov (PKPS) [Rules for the classification and construction of ships (RCCS)]. Moscow: Russian River Register, 2017 (in Russian).
- [4] Pravila klassifikaciii postrojki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva [Rules for the classification and construction of sea-going ships of the Russian Maritime Register of Shipping]. Part XI. Elektricheskoe oborudovanie

- [Electrical equipment]. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2018 (in Russian).
- [5] B.Yu. Semenov, *Silovaya elektronika. Professional'nye resheniya [Power electronics. Professional solutions]*. Saratov: Profoobrazovanie, 2017 (in Russian).
- [6] S.S. Ananicheva, A.A. Alekssev and A.L. Myzin, *Kachestvo elektroenergii. Regulirovanie napryazheniya i chastoty v energosistemah [Power quality. Regulation of voltage and frequency in power systems]*. 3rd ed. Ekaterinburg: UrFU, 2012 (in Russian).
- [7] I. I. Kartashev, V.N. Tulsy, R.G. Shamonov, Yu.V. Sharov and R.R. Nasyrov. *Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power quality management]*. Moscow: MPEI publishing house, 2006 (in Russian).
- [8] D.Y. Leyzgold, A.V. Romodin and K.P. Trushnikov, “Power quality indicators as effectiveness indicators of power management”, *Fundamental research*, no. 11-7, pp 1501–1506, 2014.
- [9] E.M. Lopukhina and G.A. Semenchukov, *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin maloj moshchnosti [Computer aided design of low power electrical machines]*. Moscow: High school, 2002 (in Russian).
- [10] A.A. Toshev and V.G. Sugakov, “Sistema возбуждениya синхронного генератора s vneshnej forsirovkoj [Excitation system of a synchronous generator with external forcing]”, *Rechnoj transport (XXI vek) [River transport (XXI century)]*, no. 1 (66), pp. 70-71, 2014 (in Russian).
- [11] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, Yu.S. Malyshev and A.A. Toshev, “Sistema возбуждениya синхронного генератора s vneshnej forsirovkoj [Excitation system of a synchronous generator with external forcing]”, Patent RU 2510698, Apr. 10, 2014 (in Russian).
- [12] V.G. Sugakov and A.A. Toshev, “Simulation system of automatic control of excitation of synchronous generator with external forcing”, in *proc. 19th congress «Velikie reki-2018» [Great rivers-2018]*, May 15-18, 2018, Volzhsky, Russia, is. 7, pp. 1-5 (in Russian).
- [13] A.A. Toshev, V.G. Sugakov and L.V. Zobov, “Mathematical simulation of automatic excitation tuning system for marine alternator with external boosting”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, no. S2, pp. 205-211, 2019. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-205-211.
- [14] V.G. Sugakov, A.A. Toshev and L.V. Zobov, “Mathematical and imitation model of the system of automatic regulation of excitation of a shipboard synchronous generator with external forcing”, *Bulletin of VSAWT*, no. 58, pp. 174-180, 2019.

Поступила в редакцию 26.11.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_52

УДК 621.313.8

М.Ю. Петушков, С.С. Холодилов

НАХОЖДЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПО ЛИНЕЙНОМУ ТОКУ

Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова
Магнитогорск, Россия

Рассмотрены типичные неисправности магнитной системы синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ): разрушение магнитов, трещины, сколы, изменение геометрии ротора, падение коэрцитивной силы и др., оставляющие свой «след» на спектральной характеристике линейного тока. Предложен метод сигнатурного анализа для обработки данных спектрального анализа. Сделан вывод о возможностях системы токовой диагностики СДПМ на основе сигнатурного анализа для предупреждения неисправностей и выхода его из строя.

Ключевые слова: синхронный генератор на постоянных магнитах, токовая диагностика, дефекты, магнитная система, сигнатурный анализ, спектральный анализ.

I. Введение

В настоящее время синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) применяются в различных отраслях техники, от микромоделей, до электротранспорта, авиации, сервоприводов и др. [1]. Широкое распространение СДПМ получили благодаря многим свойствам, в том числе – применяемым в них высококоэрцитивным магнитам. Способы крепления магнитов и их свойства обуславливают возможные неисправности СДПМ. Их поиск в режиме функциональной диагностики при нормальной эксплуатации привода возможен путем снятия спектральных характеристик линейного тока [2-4]. Анализ данных тока целесообразно выполнять методом сигнатурного анализа [5, 6]. Магниты могут быть приклеены, прикручены при помощи держателей, заключены в оболочку их стекловолокна, вставлены в пазы и др. В результате вибраций, радиальных колебаний ротора различных порядков, ударных нагрузок магниты смещаются, поворачиваются вокруг оси, трескаются. При попадании металлической стружки и накоплении ее на роторе могут происходить соприкос-

новения со статором с образованием сколов на магнитах. В роторах с применением стекловолокна данные проблемы частично решены, однако такие конструкции используют в вибронгруженных системах, в системах с высокими оборотами ротора. Любое смещение магнитов ротора приводит к дисбалансу, появлению вибрации, вплоть до разрушения ротора. Оперативный контроль формы и спектра магнитного поля позволит предупредить выходы из строя [7-9].

II. Сигнатурный анализ спектра тока СДПМ

Современные исследования в области СДПМ направлены в основном на поиски оптимальных алгоритмов управления. Анализ данных алгоритмов показал, что в абсолютном большинстве они не учитывают дефекты магнитной системы и рассматривают ее как целостную систему с определенными характеристиками. Основой принципа получения данных с двигателя является анализ систем управления, режимов работы, со ссылкой на принципы диагностики. Как датчиковые, так и бездатчиковые системы управления имеют датчики тока и напряжения. Наблюдатель получает эти данные для определения скорости, углового положения, момента сопротивления движению, электромагнитного момента и др., т.е., изначально ток в линии подвергается анализу. Следовательно, можно получить первичные данные о токе до интеграторов, фильтров и прочих элементов наблюдателя [10, 11].

Другим вариантом является анализ при помощи внешнего подключения к линии и получение данных из нее. Принципиально важной особенностью СДПМ является то, что при любом изменении частоты вращения ротора генерируется обратный ток [12]. Он обусловлен тем, что система управления достаточно точно выдерживает либо частоту вращения, либо момент, но, так или иначе, происходит частичное шунтирование цепи. Таким образом, решается задача сбора данных о токе.

Каждая неисправность двигателя (и не только она) «отпечатывается» на его спектральных характеристиках, дефекты магнитной системы не исключение. Такие дефекты магнитной системы как трещины магнитов, изменение их взаимного расположения, потеря коэрцитивной силы и т.д., неизбежно отражаются на спектральных характеристиках, что и служит отправной точкой диагностики. При моделировании в качестве интегральной характеристики достаточно рассмотреть спектр электромагнитной индукции по объему. Согласно закону Фарадея, ЭДС индукции является производной от магнитного потока, в тоже время магнитный поток является функцией модуля вектора магнитной индукции, взятой по объему. Следовательно, для анализа тока в линии, возникающего из-за шунтирования цепи и наведенной ЭДС, при моделировании достаточно рассмотреть спектр электромагнитной индукции по объему.

III. Результаты моделирования

Был проведен активный эксперимент в виде моделирования системы в программном пакете Elcut Профессиональный. Для эксперимента создана модель магнитной системы СДПМ Turnigy SK3530-1100 (рис. 1). В данном двигателе применены неодимовые магниты, конструкция с оброщенным ротором.

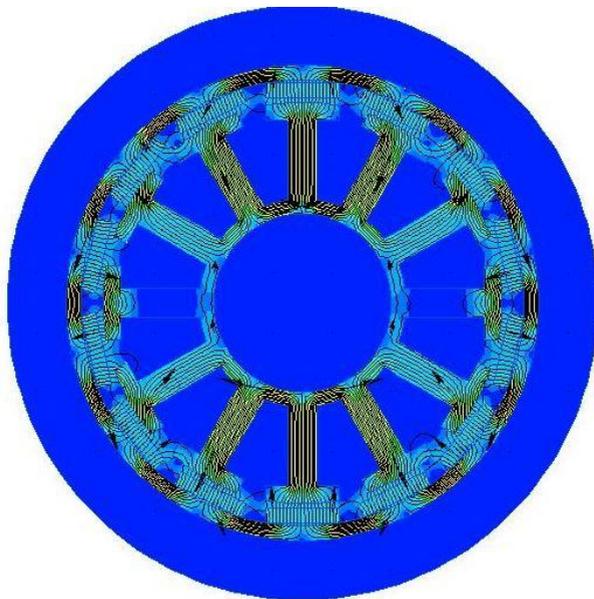


Рис. 1. Модель магнитной системы СДПМ Turnigy SK3530-1100, в пакете Elcut

Моделирование выполнялось с различными исходными параметрами по методу конечных элементов. В частности, было выполнено 512 итераций с поворотом магнитной системы по оси Z , с шагом $0,001745$ рад. Далее были внесены дефекты в магнитную систему и набор итераций повторен. В качестве считываемых данных использован интеграл магнитной индукции по объему статора. Статор был разделен на несколько законченных конструктивных элементов, для получения функции тока в катушках.

Полученные данные были подвергнуты анализу Фурье и получен спектр интегрального значения магнитной индукции. На рис. 2 представлен усеченный спектр с 10-й гармоникой интеграла индукции магнитного поля в магнитопроводе статора СДПМ по объему, полученный в результате моделирования и анализа Фурье.

В данном эксперименте была смоделирована трещина в постоянном магните шириной 0,01 мм в качестве минимального значения фактора. Подобный дефект, согласно предварительному анализу, вызывает возмущение спектральной характеристики в районе 54-й гармоники, в привязке к данному конкретному типу СДПМ. Исходя из этого, был выбран диапазон для анализа.

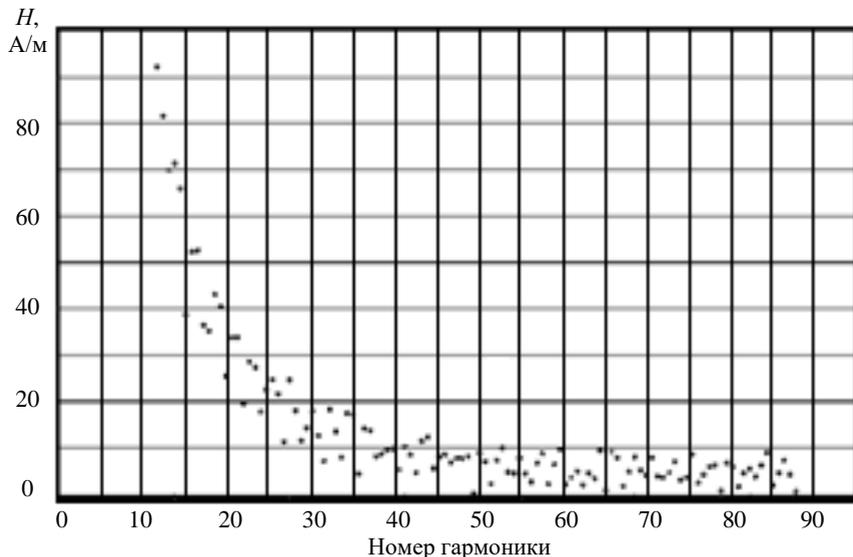


Рис. 2. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СДПМ по объему

На рис. 3 представлен спектр интеграла магнитной индукции участка статора по объему в системе без дефекта. Спектр представлен с 40-й гармоники. Как следует из рис. 3, спектр достаточно равномерный и будет использован именно для сравнения со спектром индукции в случае появления дефекта, который приведен на рис.4.

При взаимном сравнении данных выло выявлено возмущение спектра в диапазоне 42-й – 59-й гармоник. При сравнительном анализе выявлено существенное отклонение спектра в случае появления дефекта. Таким образом, подобная неисправность может быть выявлена и учтена при дальнейшей эксплуатации.

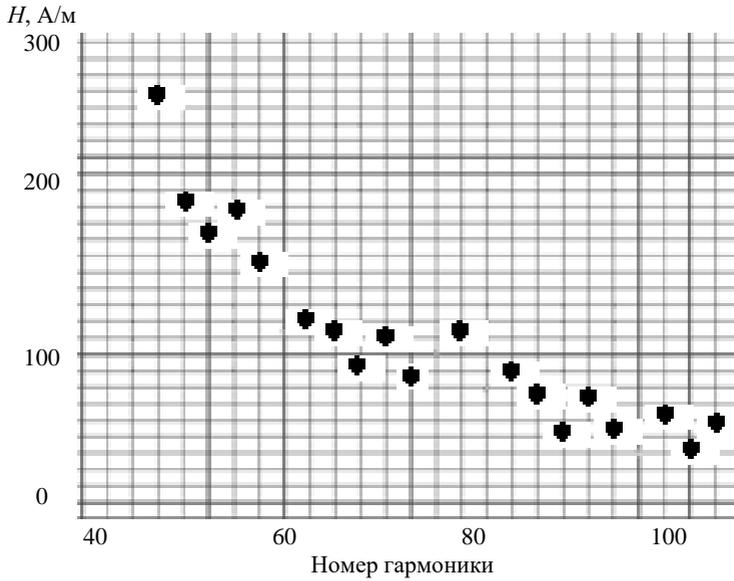


Рис. 3. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СПДМ по объему, без дефекта

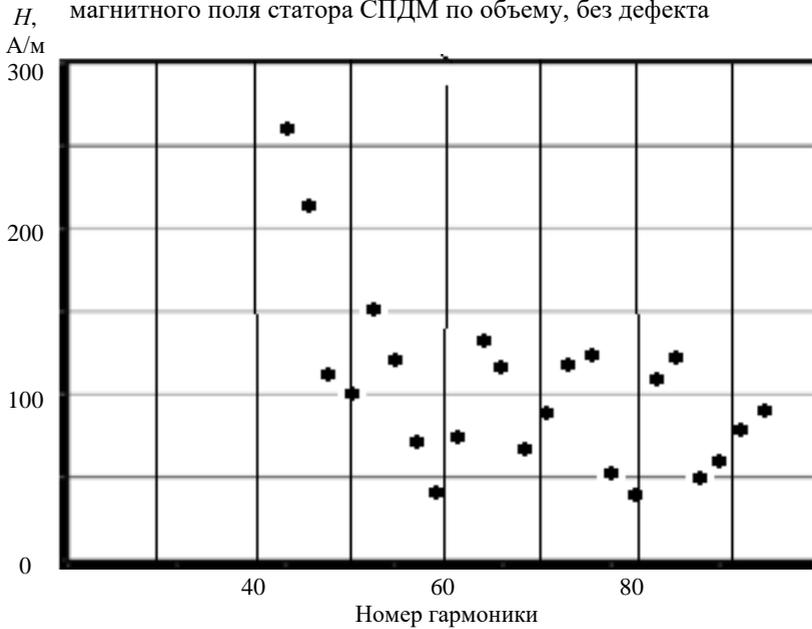


Рис. 4. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СПДМ по объему, с трещиной 0,01мм

Данный дефект незначителен для магнитной системы и рассматривается как предельный случай при планировании эксперимента. Такие дефекты, как трещины с большим зазором, повороты по оси, потеря коэрцитивной силы, вызовут значительно более сильные колебания спектра и, следовательно, могут быть выявлены данным методом.

Высокий номер гармоники и достаточно широкий гармонический состав обуславливают большое количество анализируемых данных. Для анализа большого количества данных наиболее эффективно использовать сигнатурный анализ. Сигнатурный анализ можно использовать как для методов тестовой диагностики, так и для методов функциональной диагностики, поскольку сокращается время для проведения диагностики оборудования и обнаружить дефект можно до наступления необратимых последствий [13, 14]. Для использования метода сигнатурного анализа первоначально снимают данные с исправного двигателя, составляют базу данных эталонных последовательностей и соответствующих сигнатур. Далее получают сигнатуры текущего состояния исследуемого двигателя, проводится анализ и программное обеспечение принимает решение о наличии или отсутствии определенного дефекта в электродвигателе [15].

IV. Заключение

Система токовой диагностики СДПМ на основе сигнатурного анализа позволит отслеживать характеристики привода без отрыва от производства, прогнозировать срок службы, выбирать оптимальные режимы эксплуатации, составить математические модели критических и некритических неисправностей СДПМ, оценить влияние методов управления СДПМ на его долговечность.

© Петушков М.Ю., 2020

© Холодилов С.С., 2020

Библиографический список

- [1] Петушков М.Ю., Холодилов С.С. Разработка системы диагностирования синхронных двигателей // 78-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Апрель 20–24, 2020, Магнитогорск, Россия. Тезисы докладов. Т.1. С. 317.
- [2] Petushkov M.U. Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. № 1. С. 1.
- [3] Kuptsov V.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method // Progress in Electromagnetics Research B. 2012. № 45. С. 269-290. DOI: 10.2528/PIERB12082916.

- [4] Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Современные методы диагностики и разработки асинхронных двигателей. Магнитогорск: МГТУ, 2010. – 247 с.
- [5] Завьялов А.С., Завьялов Е.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Использование сигнатурного анализа в диагностике электродвигателя постоянного тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 1 (22). С. 59-62.
- [6] ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. Введ. 2016-11-01. М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.
- [7] Осипов О.И., Агафонов А.Н. Техническая диагностика асинхронного двигателя // *Труды Московского энергетического института*. Т. 676. Электрический привод и системы управления. 2000. С. 22-29.
- [8] Смирнов В.И., Чернов Д.В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы // *Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика*. 2005. № 5. С. 52-56.
- [9] Осипов О.И., Агафонов А.Н., Агафонов С.Ю. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах // *Приборы и системы. Научные идеи В.А. Хубенко*. 1999. С. 81-84.
- [10] Cosmatov V., Petushkov M., Sarvarov A. Analysis of existing methods of diagnosis of electric motors and their development prospects // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Май 12-18, 2020, Сочи, Россия. С. 911. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030.
- [11] Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Токовая диагностика как метод контроля технического состояния асинхронных двигателей // *Иновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях*, Март 23-26, 2010, Челябинск, Россия. С. 82-86.
- [12] Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных моторов в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля, 2009.
- [13] Федоров О.В., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Электромагнитная совместимость пусковых устройств электроприводов переменного тока с питающей сетью // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2015. № 4. С. 17-19.
- [14] Белоусов О.С., Щербина Д.В., Петушков М.Ю. Проблемы эксплуатации современных электротехнических систем на установках холодной прокатки и горячей прокатки с оцинкованным покрытием // *Системы автоматизации и управления машиностроением*. 2014. С. 1-4.
- [15] Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Пути решения проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода в металлургической промышленности. *Интеллектуальная электротехника*. 2019. № 3. С. 60-74. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_3_60.

M.Yu. Petushkov, S.S. Kholodilov

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FAULT FINDING BY LINEAR CURRENT

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia

Abstract. Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in different branches of engineering. Applying the diagnostics of PMSM on the basis of current data analysis will allow to reveal faults of magnetic system and to prevent motor failure. Typical defects of the PMSM magnetic system can include: the destruction of magnets, cracks, chips, changes in rotor geometry, the fall of coercive force, etc., leaving their "trace" on the spectral characteristics of the linear current. Signature analysis is one of the methods for data processing of the spectral analysis of the current. It is possible to detect changes in the PMSM magnetic system and prevent its failure and destruction by comparing the current forms of signatures with signatures from the database characterizing the listed types of faults.

Keywords: current diagnostics, defects, magnetic system, permanent magnet synchronous machine, signature analysis, spectral analysis.

References

- [1] M.Yu. Petushkov and S.S. Kholodilov, "Razrabotka sistemy diagnostirovaniya sinhronnyh dvigatelej [Development of a diagnostic system for synchronous motors]", in proc. 78th int. scien. and tech. conf. "Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya [Actual problems of modern science, technology and education]", Apr. 20-24, 2010, Magnitogorsk, Russia, vol. 1, p. 317 (in Russian).
- [2] M.U. Petushkov, "Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start", *International Journal of Applied and Fundamental Research*, no. 1, pp. 1, 2013.
- [3] V.V. Kuptsov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, "A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method", *Progress in Electromagnetics Research B*, no. 45, pp. 269-290, 2012. DOI: 10.2528/PIERB12082916.
- [4] A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.V. Kuptsov, *Modern methods of diagnosis of induction motors and their development*. Magnitogorsk: NMSTU, 2010.
- [5] A.S. Zaviyalov, E.A. Zaviyalov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, "Signature analysis application for DC motor diagnostics", *Electrotechnical Systems and Complexes*, no. 1 (22), pp. 59-62, 2014.
- [6] Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors, GOST ISO 20958-2015, Nov. 2016.
- [7] O.I. Osipov and A.N. Agafonov, "Tekhnicheskaya diagnostika asinhronnogo dvigatelya [Technical diagnostics of induction motors]", *Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta [Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute]*.

- Vol. 676. *Elektricheskij Privod i Sistemy Upravleniya [Electric Drive and Control Systems]*, pp. 22-29, 2000 (in Russian).
- [8] V.I. Smirnov and D.V. Chernov, "Functional diagnostics of asynchronous electro-motors in transition operating modes", *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, no. 5, pp. 52-56, 2005.
- [9] O.I. Osipov, A.N. Agafonov and S.Yu. Agafonov, "Funkcional'naya diagnostika asinhronnyh elektrodvigatelej v perekhodnyh rezhimah [Functional diagnostics of asynchronous electric motors in transient modes]", *Pribory i sistemy. Nauchnye idei V.A. Hubenko [Devices and systems. V.A. Khubenko's scientific ideas]*, pp. 81-84, 1999 (in Russian).
- [10] V. Cosmatov, M. Petushkov and A. Sarvarov, "Analysis of existing methods of diagnostics of electric motors and their development prospects", in proc. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICI-EAM)*, May 12-18, 2020, Sochi, Russia, p. 911. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030.
- [11] A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.V. Kuptsov, "Tokovaya diagnostika kak metod kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinhronnyh dvigatelej [Current diagnostics as a method of control of technical state of asynchronous motors]", in proc. *Innovacionnye tekhnologii v obespechenii kachestva, energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti. Povyshenie konkurentosposobnosti metallurgicheskikh i mashinostroitel'nyh predpriyatij v sovremennyh usloviyah [Innovative technologies in quality assurance, energy efficiency and environmental safety. Increasing the competitiveness of metallurgical and machine-building enterprises in modern conditions]*, March 23-26, 2010, Chelyabinsk, Russia, pp. 82-86 (in Russian).
- [12] V.G. Tonkih, *Metod diagnostiki asinhronnyh motorov v sel'skom hozyajstve na osnove analiza ih vneshnego magnitnogo polya [Method for diagnostics of asynchronous motors in agriculture based on the analysis of their external magnetic field]*, 2009 (in Russian).
- [13] O.V. Fyodorov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, "Electromagnetic compatibility of starting devices for ac electric drives with power supply network", *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, no. 4, pp. 17-19, 2015.
- [14] O.S. Belousov, D.V. Shcherbina and M.Yu. Petushkov, "Problemy ekspluatatsii sovremennyh elektrotekhnicheskikh sistem na ustanovkah holodnoj prokatki i goryachej prokatki s ocinkovannym pokrytiem [Problems of operation of co-temporary electrical systems at cold rolling and hot-rolling plants with galvanized coating]", *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya mashinostroeniem [Automation and Control Systems for Mechanical Engineering]*, pp. 1-4, 2014 (in Russian).
- [15] M.Yu. Petushkov, A.S. Sarvarov and O.V. Fedorov, "Ways to solve proble in field of unregulated asynchronous electric drive in metallurgical industry", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 60-74, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_3_60.

Поступила в редакцию 07.12.2021

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_61

УДК 681.3

**Г.П. Муссонов, Д.С. Федосов,
И.Н. Просекин, П.А. Никонова**

ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ И НАСЫЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Рассматривается способ борьбы с дребезгом контактов коммутационной аппаратуры с электромагнитным приводом, работающей на переменном токе. Исследован состав высших гармонических составляющих и подтверждена возможность уменьшения дребезга контактов путем насыщения электротехнической стали магнитопровода. Приведены составляющие экономической эффективности.

Ключевые слова: гармонические составляющие, дребезг контактов, качество электроэнергии, режим насыщения электротехнической стали.

I. Введение

В [1] приведены результаты испытания токового реле РТ-40 с уменьшенным сечением магнитопровода, которое сделано с целью ускорения насыщения электротехнической стали и последующего исключения вибрации его подвижной системы. Уменьшение сечения магнитопровода выполнялось путем высверливания отверстий диаметром 10 мм на нескольких образцах реле. Результаты испытаний позволили сделать следующие выводы:

- 1) при погрешностях трансформаторов тока, от которых запитывались образцы, до 60 % и кратности вторичного тока по отношению к току уставки реле, достигающей 15,5 раз, все испытываемые образцы четко замыкали контакты и держали их замкнутыми;
- 2) по сравнению с реле серийного исполнения размах колебаний подвижной системы у образцов снижался в 2-3 раза.

В результате реле типа РТ-40 работают в режиме насыщения электротехнической стали в магнитопроводе реле. Для этого в магнитопроводе реле имеется глубокий вырез, который не виден снаружи, будучи закрыт катушкой реле. Данный вырез уменьшает сечение магнитопровода, что приводит к появлению высших гармонических составляющих и позволяет уменьшить вибрацию якоря реле, т.е., уменьшить дребезг контактов.

II. Состояние вопроса

В релейной защите магнитопроводы трансформаторов, встроенных в реле, например, в реле серии РП и РВМ, часто спроектированы и работают в режиме насыщения электротехнической стали. В нормальном режиме, т.е., когда токи нагрузки не превышают номинальное значение, трансформаторы реле работают на линейном участке вольтамперной характеристики. При аварийных токах (превышающих номинальное значение в 10-15 раз и более) трансформаторы переходят в режим насыщения магнитопровода. Этот эффект применяется для ограничения напряжения (тока) во вторичной обмотке трансформатора, от которой запитаны внутренние цепи реле: выпрямительные мосты, обмотки реле, конденсаторы и резисторы, используемые в качестве фильтра гармонических составляющих.

Особенностью всех типов электромеханических реле является необходимость постоянного ухода в эксплуатации за подвижными частями (очистка от пыли и грязи, смазка, проверка параметров срабатывания и возврата и др.). Это является их недостатком, но одновременно обеспечивает надежность работы релейной защиты, что вместе с низкой стоимостью и простотой исправления неисправностей, позволяет достичь хорошей ремонтпригодности. Электромеханические реле находятся в эксплуатации уже третий век: релейная защита уже была на линии переменного тока, построенной Н.О. Доливо-Добровольским в 1887-1888 гг. В настоящее время реле такого типа производятся на новой элементной базе [2].

Алгоритм релейной защиты, построенной на базе микропроцессоров, представляет собой программу, написанную в некоторой среде программирования. Эта программа реализует логику релейной защиты, т.е., если текущие значения контролируемого параметра превышает значение уставки, то выдает сигнал на срабатывание цепочки электромеханических реле, которые отключают защищаемый электроэнергетический объект. Таким образом, исполнительными элементами микропроцессорной релейной защиты также являются электромеханические реле.

У микропроцессорной релейной защиты есть существенные недостатки. Во-первых, по стоимости, приобретения, установки, наладки и ремонтпригодности пока это самая дорогая элементная база релейной защиты. Во-вторых, ее производители не раскрывают программный код и логику электронных схем (своего рода «ноу-хау»), хотя алгоритмы всех релейных защит опубликованы еще в прошлом веке и изменилась только элементная база их реализации. Поэтому есть ненулевая вероятность того, что после окончания гарантийного срока включается таймер, который через установленный или случайный промежуток времени отключит защиту и выдаст сигнал о ее неисправности. Производителей можно понять: их

продукции нужен постоянный рынок сбыта, а за время гарантийного срока появится более новый вариант этой защиты. Критике микропроцессорной релейной защиты посвящен ряд публикаций [2-8].

III. Решение задачи

В [1] не приведен гармонический анализ цепи, в которой расположены обмотки реле серии РТ-40. Результаты гармонического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Гармонический состав электрического сигнала в реле РТ-40

Номер гармонической составляющей	1	3	5	7	9	11	13
Амплитуда сигнала, мВ	250	16	6	13	7	8	9

Из табл. 1 видно, что в цепи есть гармонические составляющие только с нечетными номерами. Причем уровень максимального из них не превышает 6,4 % от основной гармонической составляющей.

График суммы всех высших гармонических составляющих приведен на рис. 1. По оси абсцисс на всех рисунках отложены радианы, по оси ординат – милливольты. Из графика видно, что при пересечении оси абсцисс кривая имеет линейный характер. Этот участок, при сложении с основной гармонической составляющей, изменит основную гармоническую составляющую так, что она получит выпуклость в этом месте. Это видно на рис. 2, где изображена сумма всех гармонических составляющих, включая первую.

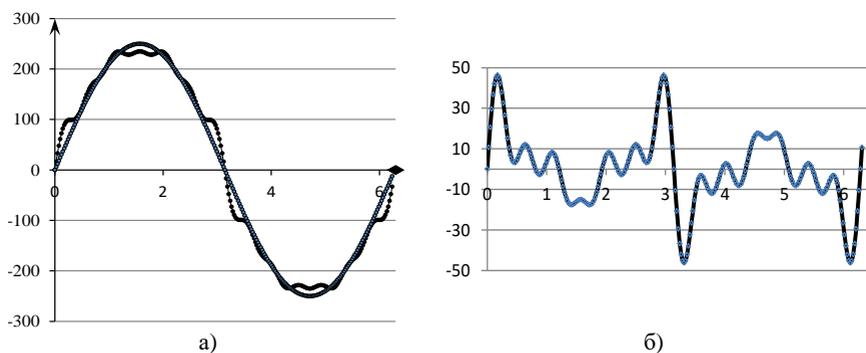


Рис. 1. Сумма всех гармонических составляющих напряжения: сумма высших гармонических составляющих с основной гармоникой (а); сумма высших гармонических составляющих без основной гармоники (б)

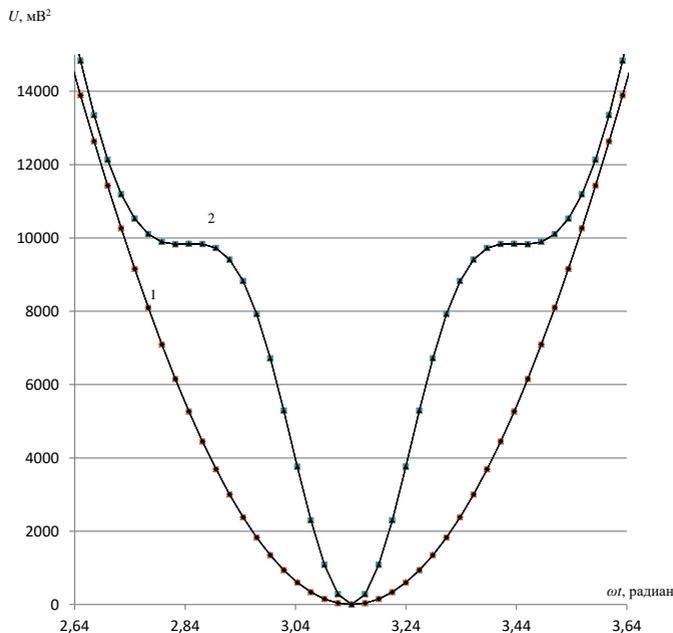


Рис. 2. Участок сигнала для электромагнитных моментов

Якорь реле движется к магнитопроводу под действием электромагнитного момента, который пропорционален квадрату сигнала в цепи, преодолевая механический момент, создаваемой пружиной, которая закручивается или ослабляется при изменении уставок. Данные о составе гармонических составляющих прибор выдает в милливольтгах. Учитывая, что в процессе измерения внутреннее сопротивление реле не меняется и равно 0,22 Ом, не имеет смысла результаты измерения переводить в токи.

Участок кривой изображен на рис. 2 для моментов, где цифрой 1 обозначен момент для реле, у которого магнитопровод не насыщен, а цифрой 2 обозначен момент, создаваемый суммой гармонических составляющих. Значения механического момента во всем диапазоне уставок находятся в области, где получилась выпуклость на рис. 2.

Исследовался диапазон изменения механического момента для следующих восьми значений: 8820, 7918, 6717, 5287 3758, 2296, 1083, 280. В этом диапазоне видно, что кривая 2 для суммы гармонических составляющих значительно уже, чем кривая 1 для основной гармоники. Это означает, что время, в течение которого механический момент превышает электромагнитный момент, значительно меньше, и, следовательно, дребезг контактов тоже меньше.

Квадрат суммы нечетных гармонических составляющих с 1-й по 13-ю, представленный на рис. 2 кривой 2, описывается выражением:

$$\left(\sum_{i=1}^{n=13} u_i\right)^2 = \sum_{i=1}^{n=13} u_i^2 + 2 \cdot \left(\sum_{i=3}^{n=13} u_1 \cdot u_i + \sum_{i=5}^{n=13} u_3 \cdot u_i + \sum_{i=7}^{n=13} u_5 \cdot u_i + \sum_{i=9}^{n=13} u_7 \cdot u_i + \sum_{i=11}^{n=13} u_9 \cdot u_i + u_{11} \cdot u_{13}\right),$$

где n – порядковый номер нечетных гармонических составляющих; u_i – величина сигнала n -ой гармонической составляющей, мВ.

Для упрощения вычисления этого выражения кривую 2 справа и слева окрестности числа π аппроксимировали методом наименьших квадратов [9-11] отрезками прямых линий. Слева от числа π выражение для значений по оси ординат Y от текущего значения радиан X имеет вид $Y = 164402 - 52746 \cdot X$, а справа – $Y = 164402 + 52746 \cdot X$.

IV. Результаты исследования

Результаты вычислений сведены в табл. 2, из которой видно, что точность аппроксимации невелика. Время превышения механического момента пропорционально длинам отрезков в радианной мере между ветвями соответствующей кривой.

Таблица 2.

Сравнение диапазонов превышения механических моментов

Значение по оси ординат, мВ ²	Диапазон в радианах			Отношение диапазонов
	кривая 2, аппроксимация	кривая 2, точное значение	кривая 1	
8821	0,1095	0,1095	0,3927	3,59
7919	0,0895	0,0895	0,3436	3,84
6717	0,0792	0,0792	0,2945	3,72
5287	0,0760	0,0760	0,2454	3,23
3758	0,0760	0,0760	0,1963	2,58
2297	0,0738	0,0738	0,1473	2,00
1084	0,0635	0,0635	0,0982	1,55
281	0,0401	0,0401	0,0491	1,22

Из последней колонки табл. 2 видно, что размах колебаний подвижной системы у образцов с насыщением электротехнической стали магнитопровода, снижался в 2-3 раза, следовательно, результаты, приведенные в [1], соответствуют действительности.

V. Заключение

Уменьшение дребезга контактов, рассмотренное выше, имеет место и для другой коммутирующей аппаратуры, где в качестве привода исполь-

зуется электромагнитная система. Например, основная доля потребляемой магнитным пускателем мощности приходится на электромагнитную систему. Часть этой мощности расходуется на потери в короткозамкнутых витках, устанавливаемых на сердечниках системы для устранения вибрации якоря после срабатывания контакторов, пускателей и реле.

Согласно [12], в эксплуатации уже находится несколько миллионов пускателей и контакторов, число их постоянно растет. Утверждается, что суммарная мощность, потребляемая электромагнитными системами контакторов, пускателей и реле, в год составляет несколько миллионов киловатт-часов. Таким образом, уменьшение потребления мощности магнитными системами контакторов, пускателей и реле имеет серьезную экономическую составляющую. Кроме того, экономический эффект появляется за счет экономии меди для короткозамкнутых витков, электротехнической стали из-за уменьшения сечения магнитопровода, а также за счет упрощения технологии изготовления, так как не нужно фрезеровать пазы для короткозамкнутых витков и изготавливать эти витки.

Срабатывания реле происходят при аварийных режимах, когда о качестве электроэнергии и так говорить не приходится. В нормальном режиме работы обмотки реле запитаны через понижающий трансформатор, который в силу своей индуктивности обладает высоким индуктивным сопротивлением и поглощает миллитоки высших гармонических составляющих. Аналогичная ситуация с магнитными пускателями, которые в основном включают двигатели, а двигатели являются индуктивным сопротивлением цепи и также поглощают миллитоки высших гармонических составляющих.

© Муссонов Г.П., 2020

© Федосов Д.С., 2020

© Просекин И.Н., 2020

© Никонова П.А., 2020

Библиографический список

- [1] Жданов Л.С., Овчинников В.В. Электромагнитные реле тока и напряжения РТ и РН // Библиотека электромонтера. Вып. 526. М.: Энергоиздат, 1981. – 72 с.
- [2] Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новые проблемы // Новости Электротехники. 2005. №6 (36).
- [3] Гуревич В.И. Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты // Электротехнический рынок. 2009. № 3 (28). С. 40-45.
- [4] Гуревич В.И. Актуальные проблемы релейной защиты: альтернативный взгляд // Вести в электроэнергетике. 2010. № 3. С. 30-43.
- [5] Гуревич В.И. Как не нужно оценивать надежность микропроцессорных устройств релейной защиты // Вести в электроэнергетике. 2010. № 5. С. 27-30.
- [6] Гуревич В.И. «Интеллектуализация» релейной защиты: благие намерения или дорога в ад? // Электрические сети и системы. 2010. № 5. С. 63-67.
- [7] Гуревич В.И. Как не нужно оценивать надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: продолжение дискуссии // Вести в электроэнергетике. 2011. № 1. С. 48-49.
- [8] Гуревич В.И. Для оценки надежности микропроцессорных устройств релейной защиты нужен новый критерий // Электротехнический рынок. 2011. № 5-6 (42). С. 66-70.
- [9] Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
- [10] Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений. М.: Недра, 1983. – 223 с.
- [11] Дринфельд Г.И. Интерполирование и способ наименьших квадратов. К.: Вища школа, 1984. – 103 с.
- [12] Ермолаев И.Н. Магнитные пускатели переменного тока // Библиотека электромонтера. Вып. 43. М.–Л., Госэнергоиздат. 1961. – 64 с.

G.P. Mussonov, D.S. Fedosov, I.N. Prosekin, P.A. Nikonova

HARMONIC COMPONENTS AND SATURATION OF ELECTRICAL STEEL

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. The paper considers a method of dealing with contact bounce of switching equipment with an electromagnetic drive, which operates in alternating current. The composition of higher harmonic components has been investigated and the possibility of reducing contact bounce by saturating the electrical steel of the magnetic circuit has been confirmed. The economic efficiency is given.

Keywords: contact bounce, harmonic components, power quality, saturation of electrical steel.

References

- [1] L.S. Zhdanov and V.V. Ovchinnikov, “Elektromagnitnye rele toka i napryazheniya RT i RN [Electromagnetic current and voltage relays RT and RN]”, *Biblioteka elektromontera [Electrician's library]*, Vol. 526. Moscow: Energoizdat, 1981 (in Russian).
- [2] V.I. Gurevich, “Mikroprotsessornyye rele zashchity. Novyye perspektivy ili novyye problemy [Microprocessor relay protection. New perspectives or new problems]”, *The News of Electrical Engineering*, №6 (36), 2005 (in Russian).
- [3] V.I. Gurevich, “Yeshcho raz o nadozhnosti mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity. [Once again on the reliability of microprocessor relay protection devices]”, *Elektrotekhnicheskij ryok [Electrotechnical market]*, № 3 (28), pp. 40-45, May-June 2009 (in Russian).
- [4] V.I. Gurevich, “Aktual'nyye problemy releynoy zashchity: al'ternativnyy vzglyad. [Actual problems of relay protection: an alternative view]”, *Electric Power News*, № 3, pp. 30-43, 2010 (in Russian).
- [5] V.I. Gurevich, “Kak ne nuzhno otsenivat' nadozhnost' mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity. [How it is not necessary to assess the reliability of microprocessor-based relay protection devices]”, *Electric Power News*, № 5, pp. 27-30, 2010 (in Russian).
- [6] V.I. Gurevich, “«Intel'tekualizatsiya» releynoy zashchity: blagiye namereniya ili doroga v ad? [“Intellectualization” of relay protection: good intentions or the road to hell?]”, *Elektricheskie seti i sistemy [Electrical networks and systems]*, № 5, pp. 63-67, 2010 (in Russian).
- [7] V.I. Gurevich, “Kak ne nuzhno otsenivat' nadozhnost' mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity: prodolzheniye diskussii. [How it is not necessary to assess the reliability of microprocessor relay protection devices: continuation of the discussion.]”, *Electric Power News*, № 1, pp. 48-49, 2011 (in Russian).
- [8] V.I. Gurevich, “Dlya otsenki nadozhnosti mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity nuzhen novyy kriteriy. [To assess the reliability of microprocessor-based relay protection devices, a new criterion is needed.]”, *Elektrotekhnicheskij ryok [Electrotechnical market]*, № 5-6 (42), pp. 66-70, Nov.-Dec. 2011 (in Russian).
- [9] Y.V. Linnik, *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [The method of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of observation processing]*. Moscow: Fizmatgiz, 1958 (in Russian).
- [10] V.D. Bolshakov, *Teoriya oshibok nablyudeniy [Theory of observation errors]*, Moscow: Nedra, 1983 (in Russian).
- [11] G.I. Drinfeld, *Interpolirovanie i sposob naimen'shikh kvadratov [Interpolation and the method of least squares]*. Kiev: Vischa shk, 1984.
- [12] I.N. Ermolaev, “Magnitnyye puskateli peremennogo toka [Magnetic starters of alternating currents]”, *Biblioteka elektromontera [Electrician's library]*, vol. 43. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1961 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_69

УДК 621.316

Б.В. Папков

НИЖЕГОРОДСКАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА ПРОФЕССОРА Е.М. ЧЕРВОННОГО

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Нижегородская область, Россия

Статья посвящена памяти Евгения Максимовича Червонного, члена-корреспондента Академии электротехнических наук РФ, доктора технических наук, профессора кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Е.М. Червонный – один из первых преподавателей кафедры «Электроснабжение» НГТУ. Он был одним из организаторов международного научного семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики им. Ю.Н. Руденко» ИСЭМ СО РАН. Евгений Максимович – автор более ста научных публикаций, руководитель и консультант нескольких кандидатских и докторской диссертации, создатель нижегородской научной школы надежности систем электроснабжения. Статья написана одним из его учеников в связи с 90-летием со дня рождения ученого.

Ключевые слова: надежность, электроснабжение, учебный процесс.



13 февраля 2020 г. исполнилось бы 90 лет члену-корреспонденту Академии электротехнических наук России, доктору технических наук, профессору кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение» НГТУ Евгению Максимовичу Червонному.

В 1948 г. он поступил на электро-механический факультет Ленинградского политехнического института, окончив его в 1954 г. по специальности «Электрические станции, сети и системы».

По распределению работал на электростанции «Красный маяк» в г. Оренбурге в должности начальника электролаборатории. С 1958 г. Евгений Максимович работал главным специалистом отдела электроснабжения в Горьковском отделении института «Электропроект», проектировал и

создавал крупные районные подстанции и системы электроснабжения промышленных предприятий.

В 1965 г. Е.М. Червонный по конкурсу избирается доцентом организованной профессором Ю.Л. Мукосеевым кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова. Практически с нуля начинается методическая работа по созданию лекционных курсов, задач практических занятий, заданий для курсового и дипломного проектирования по специальным дисциплинам «Электрооборудование электрических станций и подстанций», «Релейная защита», «Надежность электроснабжения». Создается лабораторная база, происходит наполнение библиотеки кабинета курсового и дипломного проектирования справочниками и каталогами современного оборудования.

В 1968 г. Е.М. Червонный защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация надежности электроснабжения промышленных предприятий; методы расчета», а в 1970 г. он утвержден в ученом звании доцента. С 1973 г. работает постоянно действующий международный научный семинар АН СССР (РАН) «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики им. академика Ю.Н. Руденко», членом оргбюро которого был Е.М. Червонный. Одно из заседаний этого семинара прошло в г. Горьком (1975 г.) Результаты активной научной работы представлены в докторской диссертации «Построение схем электроснабжения предприятий и управление их режимами, обеспечивающие эффективное использование внутренних резервов производства при нарушениях электроснабжения», которую он успешно защитил в 1982 г. в Сибирском энергетическом институте СО АН СССР.

В 1987 г. Евгений Максимович был утвержден в ученом звании профессора и избран на должность заведующего кафедрой «Электроэнергетика», на которой в 1992 г. началась подготовка инженеров по специальности «Электроэнергетические системы и сети». К этому времени профессором Червонным уже была создана нижегородская научная школа в области повышения надежности и эффективности функционирования систем энергетики. Под научным руководством Евгения Максимовича защищено шесть кандидатских (И.В. Альтман (Кованова), Б.В. Папков, Т.М. Щеголькова, А.Х. Аглиулин, Е.И. Татаров, М.В. Шарыгин) и докторская (Б.В. Папков) диссертация.

Исследования, проводимые Евгением Максимовичем, отличались научной строгостью, благодаря чему их окончательные результаты были ясными для понимания и практически всегда обоснованными экономически. Он обладал тонким чувством юмора, что помогало поддерживать здоровый климат в коллективе при руководстве научной работой инженеров, аспирантов и соискателей.

Е.М. Червонным опубликовано более 100 научных работ в центральных и академических периодических изданиях. Он является соавтором коллективных монографий, изданных Сибирским отделением издательства «Наука» [1, 2], и второго тома справочника «Надежность систем энергетики» [3], а также ряда учебно-методических пособий. Он был активным участником многих конференций, совещаний, семинаров, дважды выступал за рубежом на конференциях по надежности энергетики.

В 1987 г. Евгений Максимович награжден медалью «Ветеран труда»; в 1993 г. – избран членом-корреспондентом Академии электротехнических наук РФ; а в 2002 г. награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Скоропостижный уход Е.М. Червонного из жизни 20 ноября 2005 г. не позволил завершить планы по развитию научной школы «Надежность систем электроэнергетики» и повышению эффективности учебного процесса по направлению подготовки «Электроэнергетические системы и сети». Осталась неосуществленной его мечта об открытии специализации «Релейная защита и автоматика», но этот профиль (специализация) с недавнего времени занял достойное место в учебном процессе кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ.

Продолжение исследований в области научных и практических задач надежности и эффективности систем электроэнергетики отражено в шести кандидатских (Смирнов О.В., Ваулина Г.А., Карабанов А.А., Дмитриева Ю.И., Бабичев С.А., Вуколов В.Ю.) и докторской (Шарьгин М.В.) диссертациях. Созданная Е.М. Червонным нижегородская научная школа включает двенадцать кандидатов и двух докторов наук.

Научное направление, связанное с надежностью и эффективностью систем электроснабжения агропромышленного комплекса, развивается и на кафедре «Электрификация и автоматизация». Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. Выпущен ряд монографий и учебных пособий, таких, например, как «Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков» [4], «Теоретические основы надежности и эффективности электроснабжения» [5], «Проблемы кибербезопасности электроэнергетики» [6] и ряд других, отражающих идеи, высказанные Е.М. Червонным. Коллеги, ученики и последователи Евгения Максимовича достойно продолжают и развивают то, чему он посвятил всю свою сознательную жизнь.

Библиографический список

- [1] Кошечев Л.А. [и др.] Режимная управляемость систем энергетики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988. – 234 с.
- [2] Антонов Г.Н. [и др.] Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1990. – 285 с.
- [3] Воропай Н.И. [и др.] Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
- [4] Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для элэтроэнергетиков. 2-е изд. М.: Юрайт, 2016. – 470 с.
- [5] Папков Б.В., Осокин В.Л. Теоретические основы надежности и эффективности электроснабжения. Старый Оскол. 2019. – 592 с.
- [6] Папков Б.В., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Проблемы кибербезопасности электроэнергетики // Библиотечка электротехника. 2017. № 9 (225). С. 1-96.

B. V. Papkov

**NIZHNY NOVGOROD SCIENTIFIC SCHOOL
OF PROFESSOR E.M. CHERVONNY**

Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. This paper has been written by one of the students of the corresponding member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor of the chair «Power Engineering and Power Supply» of the NNSTU Evgeny Maximovich Chervonny. It is dedicated to his memory in connection with the 90th anniversary of his birth. Chervonny is one of the first and leading professors of the chair «Electrical Supply» at NNSTU, one of the organizers of the international scientific workshop n.a. Yu.N. Rudenko «Methodological problems in reliability studies of large energy systems», author of more than 100 scientific publications, supervisor and consultant of several candidate and doctoral theses, founder of the Nizhny Novgorod scientific school of reliability of power supply systems.

Key words: reliability, electric power industry, power supply, educational process.

References

- [1] L.A. Koscheev et. al., *Rezhimnaya upravlyaemost' sistem energetiki [Regime controllability of power systems]*. Novosibirsk: Science. Siberian department, 1988 (in Russian).

-
- [2] G.N. Antonov et. al., *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]*. Novosibirsk: Science. Siberian department, 1990 (in Russian).
- [3] Voropay N.I. et. al. *Reliability of energy systems and their equipment. Handbook. Vol. 2. Reliability of electric power systems*. Moscow: Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
- [4] B.V. Papkov and A.L. Kulikov, *Teoriya sistem i sistemnyj analiz dlya eletroenergetikov [Systems theory and systems analysis for electric power engineers]*. 2nd ed. Moscow: Urait Publishing House, 2016 (in Russian).
- [5] B.V. Papkov and V.L. Osokin, *Teoreticheskie osnovy nadyozhnosti i effektivnosti elektrosnabzheniya [Theoretical foundations of the reliability and efficiency of power supply]*. Sary Oskol: TNT, 2019 (in Russian).
- [6] B.V. Papkov, A.L. Kulikov and V.L. Osokin, “Problemy kiberbezopasnosti elektroenergetiki [Problems of cybersecurity of electrical energy]”, *Bibliotekha elektrotehnika [Library of Electrical Engineering]*, no. 9 (225), pp. 1-96, 2017 (in Russian).

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Поступила в редакцию 28.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_74

УДК 621.314

А.И. Серов, Е.Ю. Титов, Д.Ю. Титов, Д.А. Усачев

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предлагается схемное решение регулируемого высоковольтного преобразователя для плазмохимического реактора. Описаны условия проведения процесса. Разработана и реализована схема высоковольтного преобразователя напряжения, обеспечивающего плазмохимический процесс. Предложен и исследован простой и надежный релейный алгоритм управления силовым ключом регулятора напряжения. Оценено влияние частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения на время нарастания высоковольтного напряжения на выходе умножителя напряжения.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь, плазмохимия, электрические разряды.

1. Введение

В современной мировой нефтепереработке существует комплекс актуальных проблем, которые невозможно решить традиционными способами. Например, существующие методы переработки углеводородного сырья требуют высоких температур, давлений, применения дорогостоящих катализаторов [1, 2]. Этим обусловлено создание установок, характеризующихся исключительной металлоемкостью, громоздкостью. Поэтому требуется поиск новых более эффективных и компактных способов обработки нефтяного сырья, основанных на новых принципах воздействия на перерабатываемые вещества. В качестве инновационных решений могут выступать методы экстремального воздействия на нефтяное сырье.

Одним из экстремальных методов инициирования химических реакций является электрический разряд в жидкости [3]. Воздействие электрического разряда, которое протекает самостоятельно, индуцирует протекание сопряженной реакции трансформации субстрата, которое не осуществляется без развития первого процесса – электрического разряда. Таким образом, электрические разряды выступают в качестве индуктора – актора, инициализирующего превращение субстрата [4].

Активирование органических веществ происходит за счет воздействия импульсными электрическими разрядами на субстрат. Можно задать расстояние между электродами внутри реактора, которое обеспечит электрический пробой при определенном напряжении. Во время процесса происходит накопление продуктов в реакционном объеме, которые вызывают изменение электрической прочности реакционной смеси, что приводит к изменению напряжения пробоя. Снижение напряжения пробоя приводит к зажиганию электрической дуги. Электрическая дуга является концентрированным источником тепла, что приводит к росту температуры внутри реактора, а дальнейшее превращения субстрата связано с воздействием на него температуры. При искровом разряде возникают быстро исчезающие нитевидные искровые каналы, заполненные плазмой. Время существования разряда малое, нагрева всего реакционного объема не происходит, что позволяет предсказать и стабилизировать воздействие плазмы на характер превращений. При проведении исследований направлений превращений субстрата требуется оценить влияние напряжения на интенсивность превращений химических веществ, поэтому одним из требований к преобразователю является возможность регулирования выходного напряжения.

Плазмохимия в основном развивается в направлении совершенствования и повышения эффективности методов генерирования неравновесной плазмы с использованием высоковольтных источников [5]. В работе представлены схема и алгоритм управления регулируемого высоковольтного преобразователя, которые обеспечивают максимально возможную производительность лабораторной установки.

II. Структура преобразователя

Структурная схема регулируемого высоковольтного преобразователя представлена на рис. 1. Показаны: ПЧ – преобразователь частоты; В – выпрямитель; Ф – фильтр в звене постоянного тока; РН – регулятор напряжения; АИН – автономный инвертор напряжения; УМ – умножитель напряжения; Р – реактор; К – полупроводниковый ключ. Наличие ключа К обеспечивает требуемый характер воздействия на субстрат. Коммутация ключа К происходит при заданных значениях напряжения, что приводит к возникновению искрового разряда внутри реактора.

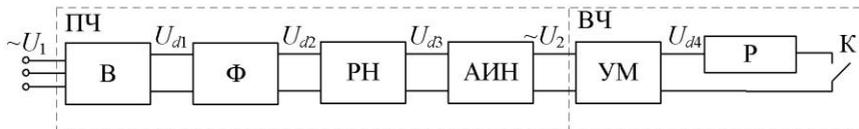


Рис. 1. Структурная схема регулируемого высоковольтного преобразователя

В приведенной схеме можно выделить два основных компонента: преобразователь частоты (ПЧ) и высоковольтная часть (ВЧ). Элементы схемы преобразователя частоты последовательно преобразуют исходное переменное напряжение U_1 в постоянное U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} соответствующего уровня и формы и, наконец, в переменное напряжение U_2 , необходимое для работы емкостного умножителя напряжения. Последний обеспечивает необходимый для образования искры уровень напряжения U_{d4} .

Блок регулятора напряжения РН позволяет регулировать напряжение в диапазоне от 0 до U_{d3} согласно:

$$U_{d3} = k_{\text{РН}} \cdot U_{d2} = k_{\Phi} \cdot k_{\text{РН}} \cdot U_{d1} = k_{\text{П}} \cdot k_{\text{РН}} \cdot U_1, \quad (1)$$

где U_{d3} – напряжение на выходе регулятора напряжения; $k_{\text{РН}}$ – коэффициент преобразования; k_{Φ} – коэффициент фильтрации; U_1 – действующее значение сетевого напряжения. Выражение (1) показывает, какие параметры влияют на величину выходного напряжения.

Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты показана на рис. 2. Неуправляемый выпрямитель может быть как однофазным, так и трехфазным. Преимущество использования трехфазного выпрямителя заключается в том, что в звене постоянного тока напряжение достигает 530 В, что увеличивает максимальное напряжение на выходе умножителя напряжения в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с однофазной схемой выпрямления. РН регулирует напряжение на конденсаторе Cf_2 в диапазоне от 0 до 530 В. Алгоритм работы РН релейный: с помощью датчика напряжения ДН измеряется напряжение на Cf_2 , которое сравнивается с заданным напряжением. Если напряжение на Cf_2 меньше заданного, то открывается ключ VT_1 , если больше – ключ закрыт. Зарядный резистор Rz ограничивает ток заряда конденсатора Cf_2 .

Принципиальная электрическая схема высоковольтной части показана на рис. 3. Напряжение на выходе умножителя можно определить согласно [6]:

$$U_{d4} = (2n - 1) \cdot U_{d3}. \quad (2)$$

В (2) отсутствует падение напряжения, вызванное протеканием тока искровой нагрузкой. Напряжение U_{d4} нарастает до момента коммутации ключами VT_1 - VT_m в заданные моменты времени, которые необходимо определить для организации плазмохимического процесса.

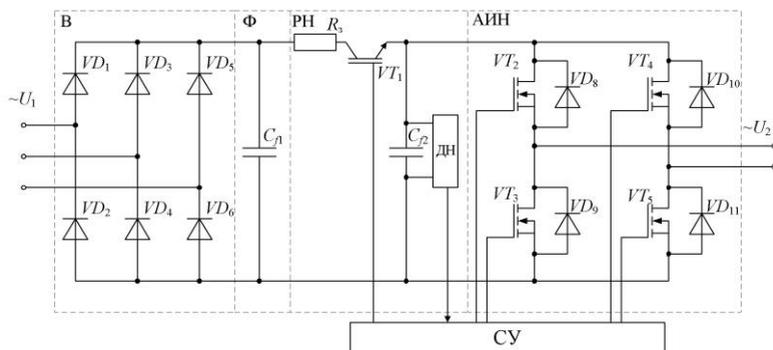


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты

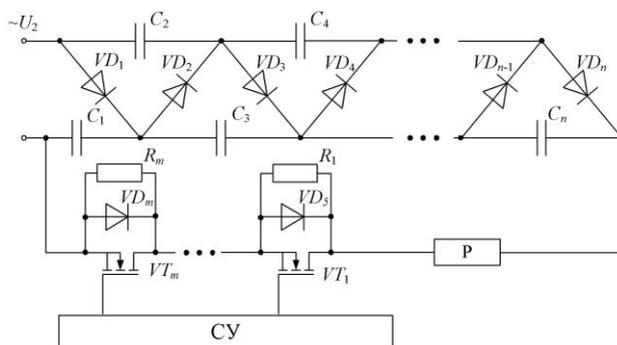


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема высоковольтной части

III. Моделирование

Модель регулируемого преобразователя, разработанная в Matlab Simulink, показана на рис. 4.

Производительность плазмохимического реактора связана с количеством разрядов в единицу времени, которое может обеспечить высоковольтный преобразователь. Результаты моделирования показывают, что наибольший вклад во время заряда конденсаторов умножителя вносит частота коммутации ключей автономного инвертора напряжения. На рис. 5 показаны графики изменения выходного напряжения умножителя в зави-

симости от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения. Хотя производительность пропорциональна частоте искрообразования, период между последовательно образуемыми искрами должен быть достаточным для релаксации активированных реагентов. Наряду с этим, отводятся продукты реакции и снижается температура в зоне реакции.

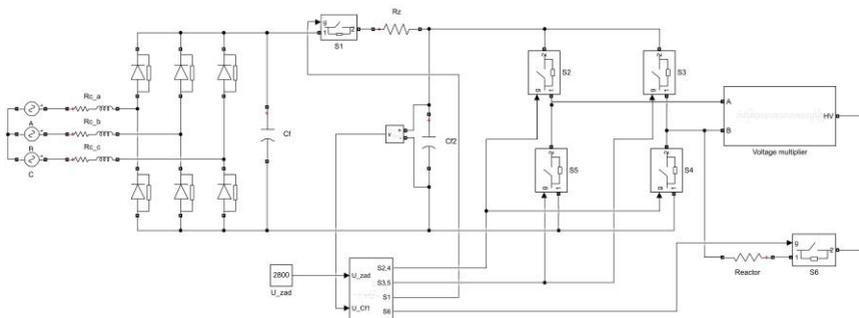


Рис. 4. Модель регулируемого высоковольтного преобразователя

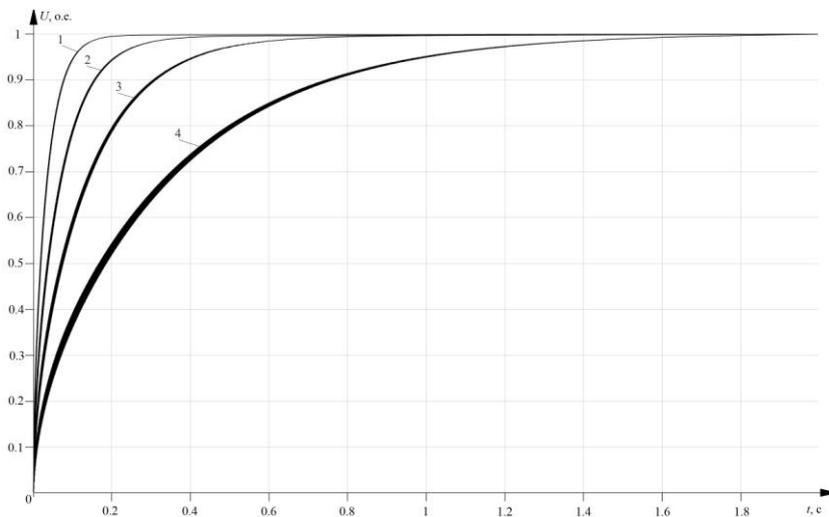


Рис. 5. Изменение выходного напряжения (о.е.) умножителя напряжения в зависимости от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения:

1 – частота коммутации 10 кГц; 2 – 5 кГц; 3 – 2,5 кГц; 4 – 1 кГц

По кривым, показанным на рис. 5, определен параметр переходного процесса – время нарастания напряжения $U_{ад}$. Зависимость времени нарастания

тания выходного напряжения от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения показана на рис. 6. Эта характеристика слабо зависит от изменения емкости конденсаторов в умножителе. Так при изменении емкости конденсаторов в умножителе напряжения в 100 раз время нарастания практически не изменилось.

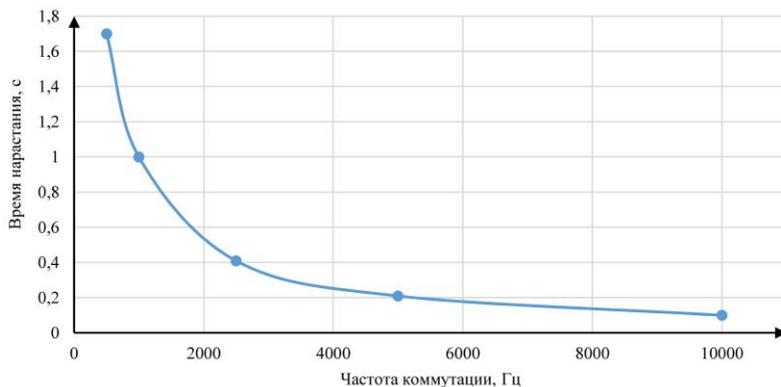


Рис. 6. Зависимость времени нарастания выходного напряжения от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения

Разработан лабораторный макет высоковольтного преобразователя (рис. 7), который позволяет регулировать напряжение до 9 кВ при потребляемой мощности до 50 Вт.

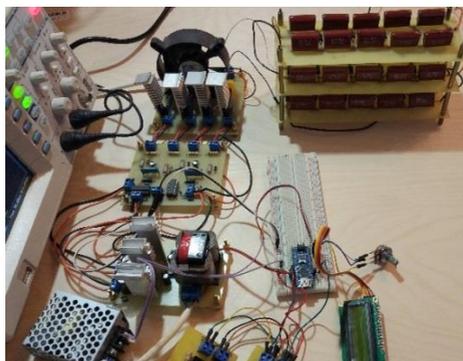


Рис. 7. Лабораторный макет регулируемого высоковольтного преобразователя

IV. Заключение

Предложен подход к параметризации регулируемого высоковольтного преобразователя. На основе компьютерной модели регулируемого высоковольтного преобразователя определены параметры алгоритма формирования сигналов управления автономного инвертора напряжения, обеспечивающего посредством регулирования частоты выходного напряжения возможность настройки нужного времени плазмохимической реакции, зависящего от исходных веществ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента № МК-16.2020.8.

© Серов А.И., 2020
© Титов Д.Ю., 2020
© Титов Е.Ю., 2020
© Усачев Д.А., 2020

Библиографический список

- [1] Sahu R., Song B.J., Im J.S., Jeon Y.P., Lee C.W. A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. Vol. 27. С. 12-24. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
- [2] Lappas A.A., Iatridis D.K., Papapetrou M.C., Kopalidou E.P., Vasalos I.A. Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors // Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 278. С. 140-149. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.092.
- [3] Бугаенко Л.Т. Способы передачи энергии в химии экстремальных воздействий // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35. № 5. С. 532-533.
- [4] Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая Школа, 1984. – 463 с.
- [5] Гольдорт В.Г., Ищенко В.Н., Рубцова Н.Н. Мощные высоковольтные источники постоянного тока с высокочастотным преобразованием // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 33-38. DOI: 10.1134/S0032816219020101.
- [6] Рогинский В.Ю. Электропитание радиоустройств. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 363.

A.I. Serov, E.Yu. Titov, D.Yu. Titov, D.A. Usachev

ADJUSTABLE HIGH VOLTAGE CONVERTER FOR PLASMA CHEMICAL REACTOR

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

Abstract. The article proposes a schematic solution of an adjustable high-voltage (HV) converter for a plasma-chemical reactor. The conditions of the process are described. A circuit of a HV voltage converter providing a plasma-chemical process has been developed and implemented. A simple and reliable relay algorithm for controlling the power switch of the voltage regulator is proposed and investigated. The influence of the switching frequency of the switches of an autonomous voltage inverter on the rise time of the HV voltage at the output of the voltage multiplier is estimated.

Keywords: electrical discharges, high-voltage converter, plasma chemistry.

References

- [1] R. Sahu, B.J. Song, J.S. Im, Y.P. Jeon and C.W. Lee, “A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 27, pp. 12-24, July 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
- [2] A.A. Lappas, D.K. Iatridis, M.C. Papapetrou, E.P. Kopalidou and I.A. Vasalos, “Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 278, pp. 140-149, Oct. 2015. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.092.
- [3] L.T. Bugaenko, “Sposoby peredachi energii v khimii ekstremal'nykh vozdeystviy” [Methods of energy transfer in the chemistry of extreme effects], *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva* [Journal of the All-Union Chemical Society named after I. D.I. Mendeleev], vol. 35, no 5, pp. 532-533, 1990 (in Russian).
- [4] N.M. Emanuel and D.G. Knorre, *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Chemical kinetics course]. Moscow: Higher School, 1984 (in Russian).
- [5] V.G. Goldort, V.N. Ishchenko and N.N. Rubtsova, “Powerful high-voltage DC power sources with high-frequency conversion”, *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 62, no 2, pp. 169-174, 2019. DOI: 10.1134/S0032816219020101.
- [6] V.Yu. Roginsky, *Elektropitaniye radioustroystv* [Power supply for radio devices]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_82

УДК 621.3.049

Д.В. Алешкин, И.В. Гуляев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Саранск, Россия

Представлена основная информация о рассеивающей электронной нагрузке постоянного тока, выступающей в роли средства измерения, способного измерить основные выходные параметры испытуемого устройства. Систематизированы ее основные режимы работы. Проанализированы вольт-амперные характеристики электронной нагрузки. Представлена схемная реализация электронной нагрузки в разных режимах ее работы. Выполнена проверка работы AC/DC и DC/DC преобразователей, аккумуляторов, портативной электроники с помощью электронной нагрузки. Приведенные результаты подтверждают, что электронные нагрузки способны поглощать электрическую энергию источника, являются регулируемым эквивалентом активного сопротивления с возможностью реализации больших мощностей. Отмечено, что электронные нагрузки являются эффективным средством повышения результативности испытаний.

Ключевые слова: режим постоянного напряжения, режим постоянной мощности, режим постоянного сопротивления, режим постоянного тока, электронная нагрузка.

1. Введение

Для имитации работы электрических нагрузок широкое применение находят устройства, представляющие собой схему, поглощающую электрическую энергию источника и функционально являющиеся регулируемым эквивалентом активного сопротивления с возможностью поглощения больших мощностей. Такая электронная нагрузка (ЭН) позволяет испытывать современные полупроводниковые преобразователи электрической энергии для реализации всевозможных схемотехнических решений.

Большинство электронных нагрузок способны выполнять как роль нагрузочного элемента, так и средства измерения с возможностью отображения на дисплее различных параметров нагружаемого источника (ток, напряжение, мощность и т.д.)

II. Цель и задачи исследования

Значительная часть современных электронных нагрузок являются запрограммированными инструментами, содержащими такие режимы работы как режим постоянного тока (*Permanent Direct Current Mode, PDCM*), постоянного напряжения (*Permanent Voltage Mode, PVM*), постоянной мощности (*Permanent Power Mode, PPM*) и постоянного сопротивления (*Permanent Resistance Mode, PRM*). Большинство моделей электронных нагрузок поддерживают режим изменения своего состояния по алгоритму, заданному пользователем. Это позволяет проводить сложные испытания, максимально соответствующие работе проверяемых устройств в реальных условиях.

Для ЭН указывается максимальный уровень мощности, который может поглотить устройство. На рис. 1 изображен пример вольтамперной характеристики (ВАХ) электронной нагрузки 200 Вт с кривой максимальной мощности, заданной производителем.

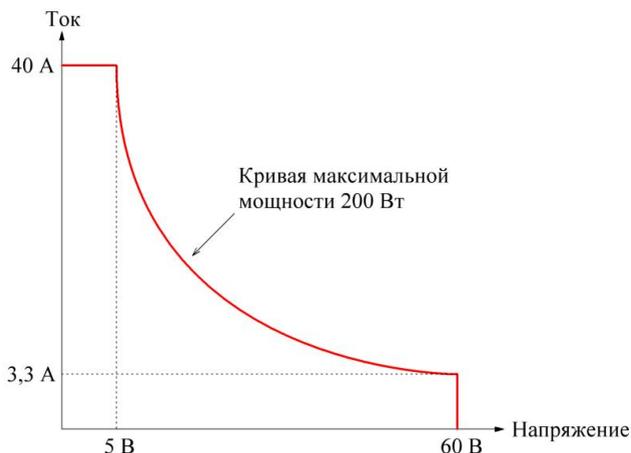


Рис. 1. ВАХ электронной нагрузки с кривой максимальной мощности

Для имитации реальной нагрузки, как правило, использовались либо наборы резисторов, либо реостаты. Такой метод тестирования испытуемого источника применяется, когда нужна имитация чисто резистивной нагрузки. В современных условиях электронная нагрузка постепенно вытесняет способы тестирования источников питания мощными резисторами, так как она способна реализовывать не только сложные алгоритмы испытаний, имитирующих реальную электрическую нагрузку, но и выступать в роли средства измерения, способного измерить основные выходные параметры испытуемого устройства [1].

III. Описание и обоснование предлагаемых методов решения поставленных задач

Рассмотрим основные режимы работы электронной нагрузки постоянного тока.

Режим постоянного тока

Самым распространенным режимом работы ЭН является режим постоянного тока (PDCM). Он характерен тем, что через электронную нагрузку протекает ток, соответствующий заданному пользователем значению, и это значение тока не меняется при изменении напряжения тестируемого устройства.

Описанный выше принцип работы ЭН отлично характеризует идеальную модель устройства, но в реальной ситуации все обстоит несколько иначе. В любой ЭН есть минимальный порог напряжения, ниже которого нагрузка не может обеспечить протекание заданного тока. Этот минимальный порог обусловлен уровнем входного тока и ВАХ МОП-транзистора при низком напряжении сток-исток [2].

Пример реальной ВАХ в режиме постоянного тока для электронных нагрузок 100 и 200 Вт представлен на рис. 2. На нем обозначено минимальное напряжение, при котором ток еще находится на запрограммированном уровне.

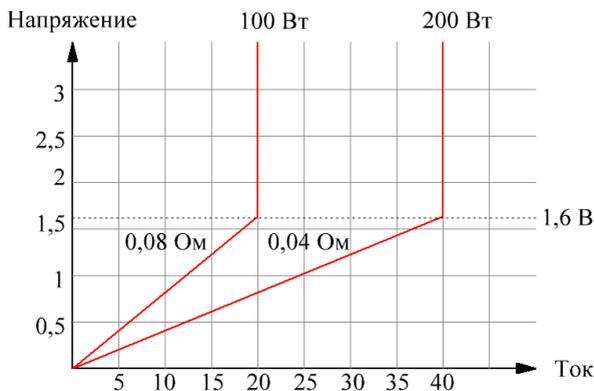


Рис. 2. ВАХ электронной нагрузки в режиме постоянного тока с минимальным поддерживаемым напряжением

Когда ЭН работает в режиме постоянного тока, она регулирует свое сопротивление таким образом, чтобы через нее протекал заданный пользователем ток. Для регулировки сопротивления используются в основном мощные МОП-транзисторы. Напряжением на затворе МОП-транзистора

можно регулировать ток, протекающий через его канал. Можно увеличить мощность нагрузки, параллельно подключив несколько таких транзисторов.

На рис. 3 предложена функциональная схема ЭН в режиме PDCM. Принцип ее работы заключается в том, что ток от тестируемого устройства, протекающий через ЭН, контролируется низкоомным шунтом R1 (например, 1 Ом). Потенциал с шунта подается на инвертирующий вход операционного усилителя (ОУ), а на неинвертирующий вход подается программируемое (задаваемое пользователем) опорное напряжение, которое стремится сделать напряжение между входами равным нулю путем изменения выходного напряжения. Выходное напряжение ОУ открывает транзистор, через который начинает протекать ток. Таким образом, меняя программируемое напряжение на неинвертирующем входе, можно контролировать ток, протекающий через транзистор.

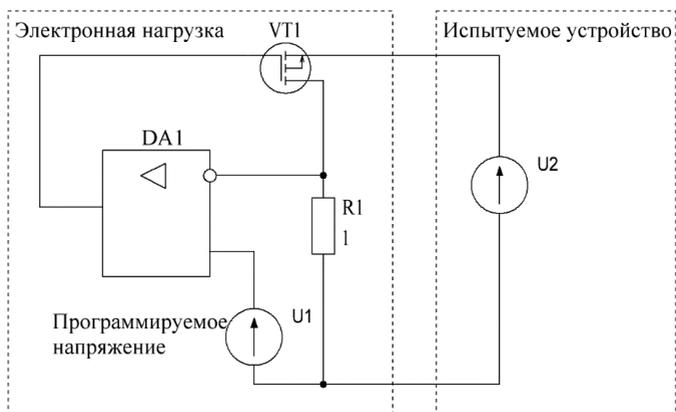


Рис. 3. Функциональная схема электронной нагрузки в режиме постоянного тока

Режим постоянного тока используется для испытаний источников напряжения и определения основных параметров, например, погрешности установки выходного напряжения и нестабильности выходного напряжения [1].

Режим постоянного напряжения

Режим постоянного напряжения (PVM) характерен тем, что на электронной нагрузке падает напряжение, заданное пользователем, и это напряжение не меняется при изменении выходного тока испытуемого устройства. В режиме PVM обычно тестируются устройства, являющиеся источниками тока (зарядное устройство, светодиодный драйвер и т.д.). Суть этого режима в том, что ЭН регулирует свое сопротивление таким

образом, чтобы поддерживать заданное напряжение при любом протекающем токе (в пределах ВАХ максимальной мощности, как на рис. 1) [3].

Функциональная схема ЭН в режиме PVM представлена на рис. 4. Принцип ее работы в том, что подающееся напряжение на ЭН контролируется через делитель напряжения. На инвертирующий вход ОУ поступает потенциал с делителя, пропорциональный напряжению источника тока (в данном случае $1/5$ напряжения источника), на неинвертирующий вход поступает запрограммированное напряжение. ОУ стремится к тому, чтобы напряжение между входами было равным нулю, путем изменения выходного напряжения. Выходное напряжение ОУ управляет МОП-транзистором таким образом, чтобы поддерживать напряжение на ЭН неизменным.

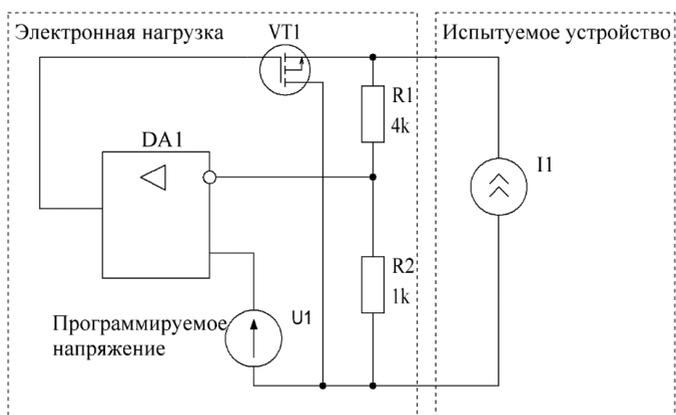


Рис. 4. Функциональная схема электронной нагрузки в режиме постоянного напряжения

ВАХ электронной нагрузки в режиме постоянного напряжения представлена на рис. 5 [1].

Режим постоянного сопротивления

Режим постоянного сопротивления (PRM) характерен тем, что на электронной нагрузке устанавливается постоянное соотношение падения напряжения к потребляемому току, что эквивалентно постоянному активному сопротивлению нагрузки. Сопротивление (отношение напряжения к току), заданное пользователем, остается постоянным при изменении выходного значения источника тока или напряжения. Режим PRM характерен тем, что электронная нагрузка работает как программируемый мощный резистор. ЭН в этом режиме используется в основном для нагрузки источников напряжения или тока [2].

На рис. 6 представлена ВАХ электронной нагрузки в режиме PRM при нагрузке источника напряжения или тока.

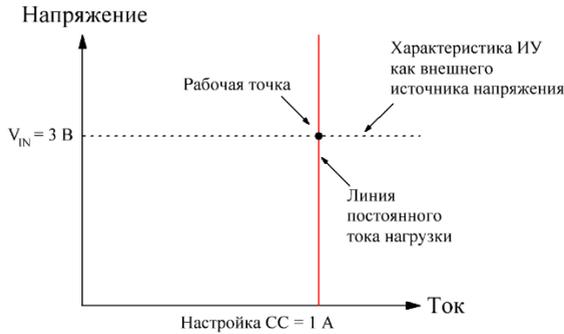


Рис. 5. ВАХ электронной нагрузки в режиме постоянного напряжения



Рис. 6. ВАХ электронной нагрузки в режиме постоянного сопротивления

Для поддержания постоянного сопротивления, следует регулировать протекающий через ЭН ток или падающее напряжение. Это зависит от подключаемого к ЭН устройства. Если это источник тока, то регулируется подаваемое напряжение, если источник напряжения – регулируется протекающий ток.

Режим постоянного сопротивления может быть весьма полезен, если запрограммировать и настроить динамически меняющееся сопротивление нагрузки на любое значение в пределах заданного диапазона. Например,

для таких измерений, как сброс/наброс нагрузки это позволяет оценить работу петли регулирования по выявленным переходным процессам [1].

Режим постоянной мощности

В режим постоянной мощности (PPM) электронная нагрузка (ЭН) нагружает испытуемое устройство (например, источник напряжения) так, что выделяемая источником мощность остается постоянной (заданной пользователем) в допустимых пределах мощности рассеивания электронной нагрузки. Постоянства заданной мощности обеспечивает регулирование падения напряжения на нагрузке и протекающего через нее тока [3].

На рис. 1 приведена ВАХ максимальной мощности при нагрузке испытываемого устройства в режиме PPM. Рисунок иллюстрирует ВАХ предельно рассеиваемой мощности. Режим PPM применяется в основном для разряда аккумуляторов с постоянно потребляемой мощностью, чтобы получить информацию о его сроке службы. На рис. 7 представлена функциональная схема ЭН в режиме PPM. Падение напряжения на ЭН контролируется через делитель напряжения, а протекающий через нее ток – через токоизмерительный шунт (падение напряжения на нем пропорционально току). Измерение потребляемой мощности производится путем умножения тока на напряжение. Результат умножения поступает на инвертирующий вход ОУ и сравнивается с запрограммированным значением мощности инвертирующего входа. В результате напряжение на выходе ОУ открывает МОП-транзистор так, чтобы нагрузка потребляла заданную мощность [1].

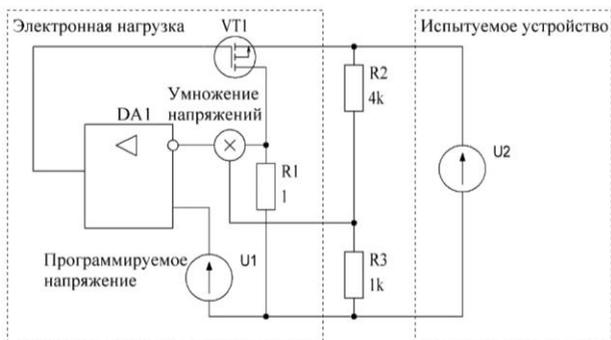


Рис. 7. Функциональная схема электронной нагрузки в режиме постоянной мощности

Измерение проводится с помощью микросхемы АЦП ICL7107, а индикация осуществляется с помощью подключаемых к ней семи сегментных индикаторов SEG1 – SEG4.

IV. Результаты

Поскольку электронные нагрузки предназначены для имитации различных режимов работы источников питания, они являются эффективным средством повышения результативности испытаний. Приведем несколько примеров.

Проверка AC/DC и DC/DC преобразователей. С помощью электронной нагрузки можно наиболее быстро и эффективно проверить работу AC/DC и DC/DC-преобразователей. ЭН может имитировать включение и выключение устройства, проверять уровни пульсаций напряжения и тока, оценивать уровень шумов и помех и т.д. По этой схеме проверялась работа преобразователей частоты асинхронизированного вентильного двигателя и бесконтактного асинхронизированного синхронного двигателя в лабораторной установке для исследования статических характеристик [4–6].

Проверка аккумуляторов. Проверка аккумулятора с помощью ЭН в режиме PPM обеспечивает постоянное потребление энергии во всем диапазоне времени тестирования и предоставляет истинные, либо максимально близкие к истинным, результаты.

Проверка портативной электроники. С помощью ЭН, запрограммированной на имитацию различных состояний, можно проверять портативные устройства при различных состояниях питания, таких как: «спящий» режим, энергосбережение и режим полной мощности [1].

V. Заключение

Приведенные результаты подтверждают, что ЭН способны поглощать электрическую энергию источника и являются регулируемым эквивалентом активного сопротивления с возможностью реализации больших мощностей. ЭН способны испытывать современные полупроводниковые преобразователи электрической энергии для реализации всевозможных схемотехнических решений.

ЭН выполняет задачу нагрузочного элемента, а также средства измерения, с отображением различных параметров нагружаемого источника для визуального исследования.

Библиографический список

- [1] Penaranda M. Electronic load fundamentals // Keysight Technologies. May 11, 2019.
- [2] Корнеев С. Новое поколение программируемых электронных нагрузок Good Will Instek // Компоненты и технологии. № 8 (121). 2011. С. 185-188.
- [3] Серков Д. Электронные нагрузки АКИП – эффективный инструмент тестирования LED-драйверов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 7 (121). С. 98-101.
- [4] Сонин Ю.П., Байнев В.Ф., Гуляев И.В. Статические характеристики бесконтактного асинхронизированного вентильного двигателя // Электротехника. 1994. № 9. С. 15-20.
- [5] Копылов И.П., Сонин Ю.П., Гуляев И.В., Никулин В.В. Бесконтактный асинхронизированный синхронный двигатель // Электротехника. 1999. № 9. С. 29-32.
- [6] Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Маняев И.В. Влияние частоты возбуждения на энергетические характеристики асинхронизированного вентильного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 81-88.

D.V. Aleshkin, I.V. Gulyaev

**USING AN ELECTRONIC LOAD FOR STUDY
OF MODERN ELECTRIC POWER CONVERTERS**

National Research Ogarev Mordovia State University
Saransk, Russia

Abstract. The article provides basic information about the DC dissipating electronic load, which acts as a measuring instrument capable of measuring the main output parameters of the device under test. Its main operating modes (permanent direct current mode, permanent voltage mode, permanent power mode, permanent resistance mode) are systematized. The current-voltage curve of an electronic load is analyzed. The schematic implementation of the electronic load in different modes of its operation is presented. The operation of AC/DC and DC/DC converters, accumulators, and portable electronics was tested using an electronic load. These results confirm that electronic loads are capable of absorbing the electrical energy of the source, are a regulated equivalent of the active resistance with the possibility of realizing high powers. It is noted that electronic loads are an effective means of increasing the effectiveness of tests.

Keywords: electronic load, permanent direct current mode, permanent voltage mode, permanent power mode, permanent resistance mode.

References

- [1] M. Penaranda, *Electronic load fundamentals*, Keysight Technologies. May 11, 2019.
- [2] S. Korneev, “Novoe pokolenie programmiruemykh ehlektronnykh nagruzok Good Will Instek [New generation of programmable electron loads Good Will Instek]”, *Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]*, no. 8 (121), pp. 185-188, 2011 (in Russian).
- [3] D. Serkov, “Electronic load AKIP – An effective LED drivers test instrument”, *Electronics: Science, Technology, Business*, no. 7 (121), pp. 98-101, 2012.
- [4] Yu.P. Sonin, V.F. Bainev and I.V. Gulyaev, “Static characteristics of contactless asynhronized thyatron motor”, *Russian Electrical Engineering*, vol. 65, no. 9, pp. 20-29, 1994.
- [5] I.P. Kopylov, Yu.P. Sonin, I.V. Gulyaev and V.V. Nikulin, “Contactless asynhronized synchronous motor”, *Russian Electrical Engineering*, vol. 70, no. 9, pp. 35-41, 1999.
- [6] I. Gulyaev, G. Tutaev and I. Manyayev, “Influence of frequency of excitation on power characteristics of asynhronized thyatron motor”, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical Sciences]*, no. 3-2, pp. 81-88, 2010 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_93

УДК 621.31:004.45

И.В. Белянин, Д.Н. Шуваев, В.В. Шарков

ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ КОНТРОЛЕРОВ NATIONAL INSTRUMENTS

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижегород, Россия

Приведены примеры решения задач построения систем управления путем программирования на языке *LabVIEW* фирмы *National Instruments*, начиная от постановки задачи, поиска решения и конечной реализации. Разработанные универсальные блоки позволяют их использовать независимо от сложности и насыщенности конкретного конечного узла силового полупроводникового устройства. Поэтому любая библиотека разработчика-программиста систем управления может быть дополнена этими универсальными блоками.

Ключевые слова: датчики синхронизирующего напряжения, полупроводниковые переключающие устройства, системы управления, счетчики.

I. Введение

Цифровизация электроэнергетики заключается, в первую очередь, в развитии базы и электронных ресурсов для дальнейшего проектирования систем управления. Известно, что наличие любого силового оборудования без системы управления (СУ) оставляет это оборудование нежизнеспособным. Элементная база для построения СУ непрерывно изменяется, развивается и совершенствуется на уровне самых последних достижений в области электроники. Интеграция современных СУ в силовую часть преобразовательных устройств выдвигает расширенные требования по реализации многозадачности, внешнего и внутреннего мониторинга, помехозащищенности, типа исполнения устройства для работы в любой внешней среде. Запросы к разработчику, в первую очередь, связаны с эргономикой (удобством) управления, расширением функционала, внедрением новых научных решений для связи конкретной силовой энергетической установ-

ки с цифровой интеллектуальной средой. Соответственно, резко возрастает роль анализа при выборе управляющего оборудования, идет поиск инженерных решений, которые помогут достигнуть некоего оптимума при проектировании, разработке и внедрении того или иного устройства.

Существующие решения можно объединить в три категории [1]:

- различные виды контроллеров (от промышленных до микроконтроллеров);
- программируемые логические интегральные схемы (*FPGA*);
- промышленные компьютеры.

Все они уже не могут рассматриваться как отдельно взятые, неизменные и не интегрируемые. Сегодня все производители, так или иначе, осуществляют такую интеграцию. Ярким примером является компания *National Instruments (NI)*, которая начинала как производитель информационно-измерительной техники, а ныне является самым известным поставщиком комплексных решений для разных сфер разработки СУ. Номенклатура оборудования *NI* содержит широкий спектр решений, которые могут быть применены в разных сферах, в том числе и для построения СУ силовых полупроводниковых переключающих устройств. Хотелось бы отметить, что такие устройства в дальнейшем можно успешно использовать для построения интеллектуальных электрических сетей *Smart Grid*.

Практика показала, что лучше всего себя зарекомендовали платформы *CompactRIO* [2, 3], представляющие собой полноценные контроллеры в промышленном исполнении с защитой от внешних температурных, лучевых и механических воздействий. Конечно, стоимость таких решений на порядок выше, чем у более простых и доступных устройств. На второе место по полярности следует поставить платформы на базе многофункциональных плат, объединяющих в себе процессор *ARM*, ОС *NI Linux Real-Time*, программируемое устройство ПЛИС *Xilinx*, запоминающее устройство, аналоговый и цифровой ввод-вывод, порты периферийных устройств процессора и разъем с большим числом выводов для специализированных дочерних плат [4, 5]. На третьем месте находятся решения *MyRIO*. При этом следует учитывать, что они разрабатывались для решения учебных задач, но могут быть использованы для отладки новых программных решений.

II. Описание и программирование датчиков синхронизирующих напряжений

К настоящему времени в СУ силовыми переключающими устройствами четко сформировались основные программные блоки, отвечающие за те или иные функции, к каждому из которых предъявляются специфические требования по быстродействию и надежности [6, 7]. В первую оче-

редь отметим блоки синхронизации с внешними силовыми цепями [8, 9]. Казалась бы, задача отслеживания перехода через ноль синхронизирующих напряжений является тривиальной, однако на практике при разработке СУ разработчики сталкиваются с рядом проблем, которые можно устранить на этапе проектирования [10–14]. Рассмотрим в качестве примера датчики напряжения (рис. 1), успешно реализованные при разработке тиристорно-трансформаторных модулей цифровых подстанций и высоковольтных регуляторов напряжения [15–17].

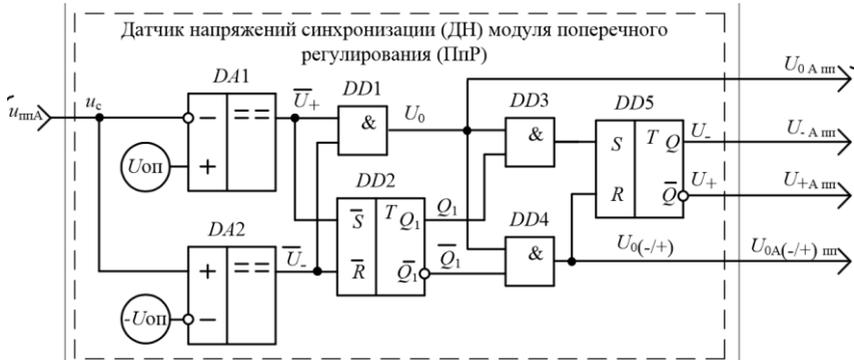


Рис. 1. Датчик напряжения

На диаграмме (рис. 2) видно, что основной задачей является выделение на уровне порога срабатывания некоторого коридора U_0 , при котором синхронизирующее напряжение чуть выше порога срабатывания и чуть ниже установленного порога. Теоретически это делается с использованием простой логики построенной на RS -триггерах.

Однако на практике при программировании возникли следующие проблемы. В языке программирования *LabVIEW* и его элементах отсутствует такое понятие как RS -триггер. Есть реализация для уровня устройств, работающих в *Real Time*, но для уровней ПЛИС (*FPGA*) она отсутствует. Реализация с помощью простых элементов И или И-НЕ приводит к возникновению обратных связей, не гарантирующих точность срабатывания триггеров. Поэтому была предложена реализация на языке программирования *VHDL*. Ниже приведен программный код такого триггера.

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
ENTITY SRff IS PORT (
S, R, Clock, Clear: IN STD_LOGIC;
Q: OUT STD_LOGIC);
```

```
END SRff;  
ARCHITECTURE Behavior OF SRff IS  
BEGIN  
PROCESS (Clock, Clear) -- sensitivity list is used  
BEGIN  
IF (Clear = '1') THEN  
Q <= '0';  
ELSE  
IF Clock'EVENT AND Clock = '1' THEN  
IF (R = '1') THEN  
Q <= '0';  
ELSIF (S = '1') THEN  
Q <= '1';  
END IF;  
END IF;  
END IF;  
END PROCESS;  
END Behavior;
```

В дальнейшем этот код переводится в формат *XML*, легко подхватывается компилятором программного кода *FPGA* для генерации конечного программного продукта, что позволяет единожды сгенерированный код неоднократно использовать в разработках без привязки к версиям программного обеспечения. Практика показала, что простые компараторы, относительно которых формируются управляющие импульсы, должны иметь не два, а шесть различных уровней срабатывания. Специфика разработанной программы заключается в том, что сделаны разделения обработки входного сигнала, и функции триггера *DD2* разделены между двумя такими триггерами, позволяя увеличить точность срабатывания. Кроме того, внедрены пороги нечувствительности для предотвращения влияния помех. Все это позволило создать датчик напряжения, четко отрабатывающий переходы через ноль контролируемого напряжения в условиях девиации частоты и уровня входного сигнала (рис. 3). Кроме того, отладочные выходы «Отладка > 0», «Отладка < 0», «Отладка не 0», «U0 для пилы», «U0» позволяет в готовом устройстве вывести временные диаграммы на осциллограф для контроля правильности выбранных уровней срабатывания датчика.

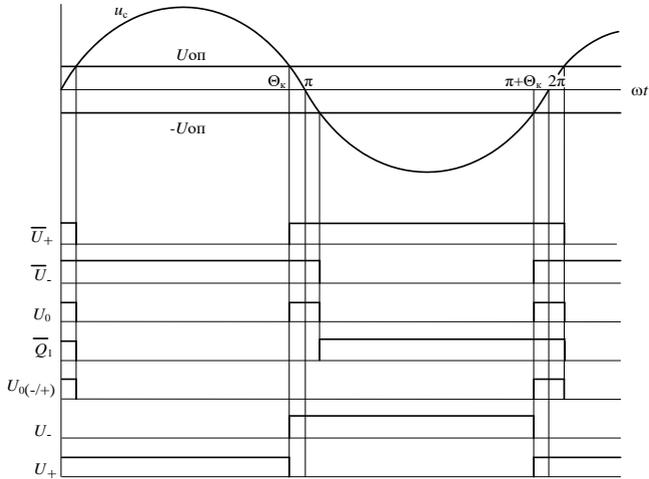


Рис. 2. Диаграммы работы датчика напряжений синхронизации

III. Создание и программирование быстродействующих программных счетчиков

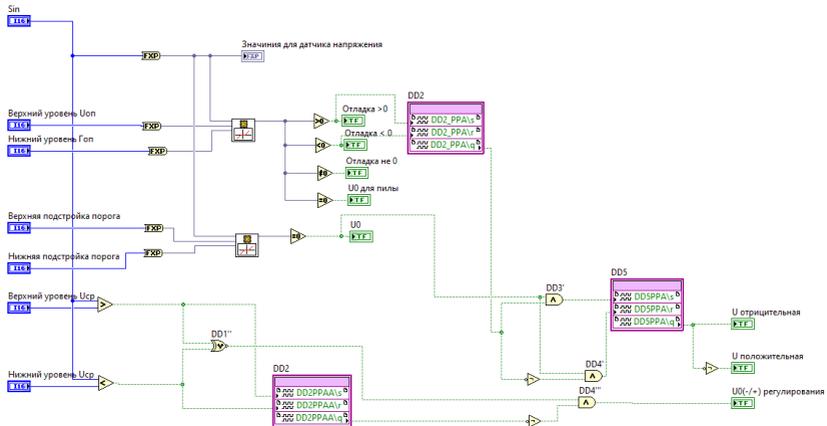


Рис. 3. Программная реализация датчика напряжения

Еще одной задачей, которую приходится решать на уровне программирования СУ для полупроводниковых переключающих устройств на языке *LabVIEW*, является создание быстродействующих дискретных счетчиков [13, 14]. Без таких счетчиков невозможно построение СУ для реали-

зации дискретного и плавного регулирования. Главным требованием выступает наличие управляющих входов такого счетчика, полностью соответствующих обычной цифровой схемотехнике. На рис. 4 приведен пример такого решения.

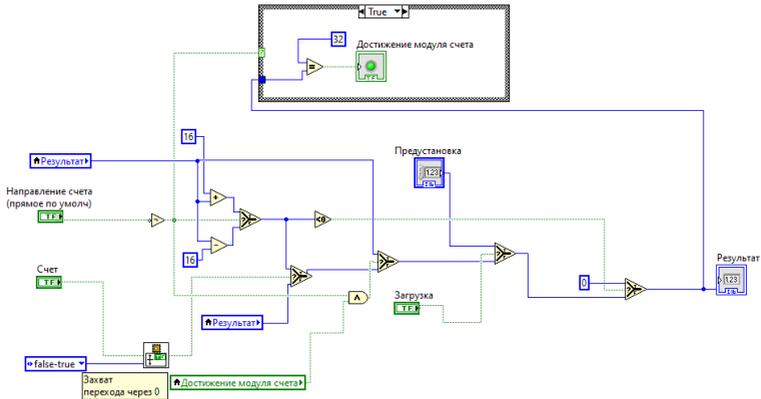


Рис. 4. Шестнадцатеричный программный счетчик

Особенностью построения такого счетчика, является то, что он может быть легко преобразован внутренними настройками из шестнадцатеричного в десятичный или двоичный. Более того, эти настройки легко совмещаются, и получается универсальный счетчик, реагирующий на любые перепады входного сигнала *false-true*, *true-false*, *either*.

На рис. 5 видно, что фактически универсальный счетчик построен на двух независимых кейсах *True-False*, позволяющих осуществлять дискретное и плавное регулирование в СУ, осуществлять предустановку по фронту или спаду регулирующего сигнала, разрешать или запрещать счет по требованию алгоритма СУ.

IV. Заключение

Рассмотренные программные решения были в полной мере реализованы при разработке систем управления цифровыми подстанциями [15] и регуляторами напряжения [16, 17], показав свою эффективность и надежность. Фактически получились новые цифровые элементы управления, которые можно использовать в дальнейших разработках. Это позволяет легко осуществлять масштабирование СУ не только для полупроводниковых переключающих устройств для интеллектуальных электрических сетей *Smart Grid*, но и для любых других устройств силовой электроники.

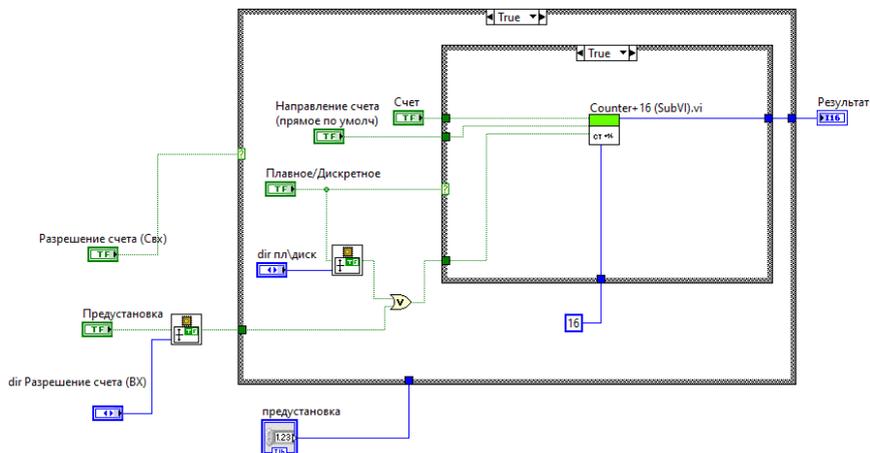


Рис. 5. Двухзонный универсальный программный счетчик

Разработка специализированных библиотек цифровых управляющих элементов позволяет сократить время и трудоемкость внедрения новых решений при программировании систем управления полупроводниковыми переключающими устройствами на базе контролеров *National Instruments*. Эти работы ведутся специалистами кафедры прикладной информатики, информационных технологий, радио- и электротехники ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

© Белянин И.В., 2020

© Шуваев Д.Н., 2020

© Шарков В.В., 2020

Библиографический список

- [1] Baumann J. Eye on Europe: Visualizing the network // *Utility Automation & Engineering T&D*. 2007. – 48 с.
- [2] Bourhmane S., Abid M.R., Lghoul R., Zine-Dine K., Elkamoun N., Bakhouya M., Benhaddou D. Real-time control of smart grids using NI CompactRIO // in proc. 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Apr. 3-4, 2019, Fez, Morocco. С. 1-6. DOI: 10.1109/WITS.2019.8723840.
- [3] Zhang M., Sun Y., Dang S., Petrou K. Smart grid-oriented algorithm of data retrieval and processing based on cRIO // in proc. 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), Apr. 26-28, 2014, Sapporo, Japan. С. 686-689. DOI: 10.1109/InfoSEEE.2014.6947752.

- [4] Thiyagarajan K., Saravanakumar R. Real time energy management and load forecasting in smart grid using CompactRIO // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 85. C. 656-661. DOI: 10.1016/j.procs.2016.05.250.
- [5] Cheah P.H., Sivaneasan B., Ravi Kishore K.V., Anima G., Foo M.K., Gooi H.B. Developing a functional smart grid prototype using NI LabVIEW, NI CompactRIO, and NI DAQ.
- [6] Almas M.S., Vanfretti L., Baudette M. BabelFish – Tools for IEEE C37.118.2-compliant real-time synchrophasor data mediation // *SoftwareX*. 2017. Vol. 6. C. 209-216. DOI: 10.1016/j.softx.2017.08.002.
- [7] Laverty D.M., Best R.J., Brougan P., Al Khatib I., Vanfretti L., Morrow D.J. The OpenPMU platform for open-source phasor measurements // *Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2013. № 62(4). C. 701-709. DOI: 10.1109/TIM.2013.2240920.
- [8] De La Ree J, Centeno V., Thorp J.S., Phadke A.G. Synchronized phasor measurement applications in power systems // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010. № 1(1). C. 20-27. DOI: 10.1109/TSG.2010.2044815.
- [9] Baudette M., Vanfretti L., Del-Rosario G., Ruiz-Alvarez A., Dominguez-Garcia J.L., Al-Khatib I., Almas M.S., Cairo I., Gjerde J.O. Validating a real-time PMU-based application for monitoring of sub-synchronous wind farm oscillations // in proc. ISGT 2014, Feb. 19-22, 2014, Washington, USA. C. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2014.6816444.
- [10] Almas M.S., Baudette M., Vanfretti L., Løvlund S, Gjerde J.O. Synchrophasor network, laboratory and software applications developed in the STRONG²rid project // in proc. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA. C. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2014.6938835.
- [11] Vanfretti L., Al-Khatib I., Almas M.S. Real-time data mediation for synchrophasor application development compliant with IEEE C37.118.2 // in proc. 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Feb. 18-20, 2015, Washington, USA. C. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2015.7131910.
- [12] Vanfretti L., Aarstrand V.H., Almas M.S., Perić V.S., Gjerde J.O. A software development toolkit for real-time synchrophasor applications // in proc. 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France. C. 1-6. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652191.
- [13] IEEE C37.118.1-2011. IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems. Введ. 2011-12-07. IEEE, 2011. – 61 с.
- [14] IEEE C37.118.2-2011. IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems. Введ. 2011-12-07. IEEE, 2011.
- [15] Лоскутов А.Б., Чивенков А.И., Соснина Е.Н., Белянин И.В., Бедретдинов Р.Ш., Липужин И.А. Цифровая трансформаторная подстанция, Пат. 2552842 RU, заявл. 17.10.13; опубл. 10.06.15.
- [16] Соснина Е.Н., Асабин А.А., Белянин И.В., Кралин А.А., Крюков Е.В. Система управления твердотельным регулятором напряжения, Свидетельство о гос. рег. 2016660042, заявл 20.07.16; опубл. 05.09.16.
- [17] Асабин А.А., Белянин И.В., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В. Система управления тиристорного регулятора напряжения. Интеллектуальная электротехника. 2020. № 1 (9). С. 25-39. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_1_25.

I.V. Belyanin, D.N. Shuvaev, V.V. Sharkov

SELECTION OF EQUIPMENT AND FEATURES OF BUILDING CONTROL SYSTEMS FOR SEMICONDUCTOR SWITCHING DEVICES BASED ON NATIONAL INSTRUMENTS CONTROLLERS

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The development of a control system (CS) for any power semiconductor device requires the presence of control elements for the implementation of basic functions. So the synchronization of the CS is impossible without the presence of specialized voltage sensors, which make it possible to track the transition of this voltage through zero, relative to which the control angles are further counted. The introduction of flexible control in discrete and smooth mode is carried out through digital counters counting the necessary control angle for power semiconductor devices. Previously, this problem was solved at the level of the simplest transistor-transistor logic (TTL), implemented using chips. Now this is solved by programming logical integrated circuits (FPGA). The article considers examples of such an implementation by programming in the LabVIEW language of National Instruments, starting from setting a problem, finding a solution and the final implementation. The developed universal blocks allow them to be used regardless of the complexity and saturation of a particular end node of a power semiconductor device. Therefore, any library of the developer - programmer of control systems can be supplemented by these universal units.

Keywords: control systems, digital meters, semiconductor switching devices, sync voltage sensors.

References

- [1] J. Baumann, Eye on Europe: Visualizing the network, *Utility Automation & Engineering T&D*. 2007.
- [2] S. Bourhane, M.R. Abid, R. Lghoul, K. Zine-Dine, N. Elkamoun, M. Bakhouya and D. Benhaddou, "Real-time control of smart grids using NI CompactRIO", in proc. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Apr. 3-4, 2019, Fez, Morocco, pp. 1-6. DOI: 10.1109/WITS.2019.8723840.
- [3] M. Zhang, Y. Sun, S. Dang and K. Petrou, "Smart grid-oriented algorithm of data retrieval and processing based on cRIO", in proc. *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE)*, Apr. 26-28, 2014, Sapporo, Japan, pp. 686-689. DOI: 10.1109/InfoSEEE.2014.6947752.
- [4] K. Thiyagarajan and R. Saravanakumar, "Real time energy management and load forecasting in smart grid using CompactRIO", *Procedia Computer Science*, vol. 85, pp. 656-661, 2016. DOI: 10.1016/j.procs.2016.05.250.

- [5] P.H. Cheah, B. Sivaneasan, K.V. Ravi Kishore, G. Anima, M.K. Foo and H.B. Gooi, "Functional smart grid prototype using NI LabVIEW, NI DAQ hardware and NI FPGA CompactRIO". [Online]. Available at: <https://www.ni.com/en-us/innovations/case-studies/19/developing-a-functional-smart-grid-prototype.html> [Accessed: Dec. 14, 2020].
- [6] M.S. Almas, L. Vanfretti and M. Baudette, "BabelFish – Tools for IEEE C37.118.2-compliant real-time synchrophasor data mediation", *Software X*, vol. 6, pp. 209-216, 2017. DOI: 10.1016/j.softx.2017.08.002.
- [7] D.M. Laverty, R.J. Best, P. Brogan, I. Al Khatib, L. Vanfretti and D.J. Morrow, "The OpenPMU platform for open-source phasor measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 4, pp. 701-709, Apr. 2013. DOI: 10.1109/TIM.2013.2240920.
- [8] J. De La Ree, V. Centeno, J.S. Thorp and A.G. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 20-27, June 2010. DOI: 10.1109/TSG.2010.2044815.
- [9] M. Baudette, L. Vanfretti, G. Del-Rosario, A. Ruiz-Alvarez, J.L. Dominguez-Garcia, I. Al-Khatib, M.S. Almas, I. Cairo, J.O. Gjerde, "Validating a real-time PMU-based application for monitoring of sub-synchronous wind farm oscillations", in proc. *ISGT 2014*, Feb. 19-22, 2014, Washington, USA, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2014.6816444.
- [10] M.S. Almas, M. Baudette, L. Vanfretti, S. Løvlund and J.O. Gjerde, "Synchrophasor network, laboratory and software applications developed in the STRONG²rid project", in proc. *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, July 27-31, 2014, National Harbor, USA, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2014.6938835.
- [11] L. Vanfretti, I. Al-Khatib and M.S. Almas, "Real-time data mediation for synchrophasor application development compliant with IEEE C37.118.2", in proc. *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Feb. 18-20, 2015, Washington, USA, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2015.7131910.
- [12] L. Vanfretti, V.H. Aarstrand, M.S. Almas, V.S. Perić and J.O. Gjerde, "A software development toolkit for real-time synchrophasor applications", in proc. *2013 IEEE Grenoble Conference*, June 16-20, 2013, Grenoble, France, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652191.
- [13] IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems, IEEE C37.118.1-2011, Dec. 2011.
- [14] IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems, IEEE C37.118.2-2011, Dec. 2011.
- [15] A.B. Loskutov, A.I. Chivenkov, E.N. Sosnina, I.V. Belyanin, R.Sh. Bedretdinov and I.A. Lipuzhin, "Digital transformer substation", Patent RU 2552842, June 10, 2015.
- [16] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, I.V. Belyanin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov, "Sistema upravleniya tverdotel'nyim regulyatorom napryazheniya [Solid state voltage regulator control system]", Certificate of state registration No. 2016660042, Sept. 05, 2016 (in Russian).
- [17] A.A. Asabin, I.V. Belyanin, E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov and E.V. Kryukov, "Thyristor voltage regulator control system", *Smart Electrical Engineering*, no. 1 (9), pp. 25-39, 2020. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_1_25.

НАШИ АВТОРЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Асабин Анатолий Александрович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; asanatoliy@yandex.ru

Бедретдинов Рустам Шамилевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; rsb88@yandex.ru

Белянин Игорь Владимирович – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, кандидат технических наук; belyanin@ioo.unn.ru

Варламов Никита Сергеевич – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; varlamov_nikita@mail.ru

Веселов Леонид Евгеньевич – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; veselov022@gmail.com

Ковин Владимир Михайлович – инженер ООО «Теком»; vladimir.kovin@gmail.com

Крюков Евгений Валерьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; kryukov@nntu.ru

Муссонов Геннадий Петрович – доцент Иркутского национального исследовательского технического университета, кандидат технических наук; genmuss@gmail.com

Никонова Полина Андреевна – магистрант Иркутского национального исследовательского технического университета; polya.nikonova@yandex.ru

Папков Борис Васильевич – профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, доктор технических наук; boris.papkov@gmail.com

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

Просекин Игорь Николаевич – студент Иркутского национального исследовательского технического университета; prosekin1998@mail.ru

Соснина Елена Николаевна – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; sosnyna@yandex.ru

Сугаков Валерий Геннадьевич – профессор Волжского государственного университета водного транспорта, доктор технических наук; **elektrikasp@mail.ru**

Тошев Александр Александрович – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; **toshev_a@mail.ru**

Федосов Денис Сергеевич – заведующий кафедрой Иркутского национального исследовательского технического университета, кандидат технических наук; **fedosov_ds@bk.ru**

Холодилов Сергей Сергеевич – аспирант Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; **s.kholodilov@mail.ru**

Шалухо Андрей Владимирович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **shaluho@nttu.ru**

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Алешкин Дмитрий Васильевич – студент Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; **alyoshkin.dmitry@yandex.ru**

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

Гуляев Игорь Васильевич – профессор Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, доктор технических наук; **ivgulyaev@mail.ru**

Серов Антон Игоревич – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **anton.serov710@gmail.com**

Титов Дмитрий Юрьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **d.titov@nttu.ru**

Титов Евгений Юрьевич – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **e.titov@nttu.ru**

Усачев Данил Андреевич – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **danil.usachyov@yandex.ru**

Шарков Валерий Валерьевич – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, кандидат физико-математических наук; **sharkov@rf.unn.ru**

Шуваев Дмитрий Николаевич – и.о. заведующего кафедрой Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, кандидат технических наук; **ioo@ioo.unn.ru**

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2020

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2020. No. 4 (12). – 108 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)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, 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)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, 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.ntnu.ru>

ISSN 2658-6754

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

CONTENTS

CHRONICLES	4
A.B. Loskutov. GOELRO plan in the 21st century	4
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	6
A.A. Asabin, E.N. Sosnina, I.V. Belyanin, E.V. Kryukov, R.Sh. Bedretdinov, V.M. Kovin. Thyristor voltage regulator experimental research.....	6
E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, L.E. Veselov. Application of SOFCs on biogas in power supply systems for agricultural enterprises	27
V.G. Sugakov, A.A. Toshev, N.S. Varlamov. Transition processes research in ship synchronous generators' excitation regulation systems with external forcing.....	42
M.Yu. Petushkov, S.S. Kholodilov. Permanent magnet synchronous motors fault finding by linear current	52
G.P. Mussonov, D.S. Fedosov, I.N. Prosekin, P.A. Nikonova. Harmonic components and saturation of electrical steel.....	61
B.V. Papkov. Nizhny Novgorod scientific school of professor E.M. Chervonny.....	69
POWER ENGINEERING	74
A.I. Serov, E.Yu. Titov, D.Yu. Titov, D.A. Usachev. Adjustable high voltage converter for plasma chemical reactor.....	74
D.V. Aleshkin, I.V. Gulyaev. Using an electronic load for study of modern electric power converters.....	82
I.V. Belyanin, D.N. Shuvaev, V.V. Sharkov. Selection of equipment and features of building control systems for semiconductor switching devices based on National Instruments controllers.....	93
Authors	103

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

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

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 30.12.2020. Дата выхода в свет: 25.02.2021

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 6,75. 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.