

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

Поступила в редакцию 08.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754\_2020\_4\_06

УДК 621.316

**А.А. Асабин<sup>1</sup>, Е.Н. Соснина<sup>1</sup>, И.В. Белянин<sup>2</sup>,  
Е.В. Крюков<sup>1</sup>, Р.Ш. Бедретдинов<sup>1</sup>, В.М. Ковин<sup>3</sup>**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

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

*Нижний Новгород, Россия*

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

*Нижний Новгород, Россия*

<sup>3</sup> 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.

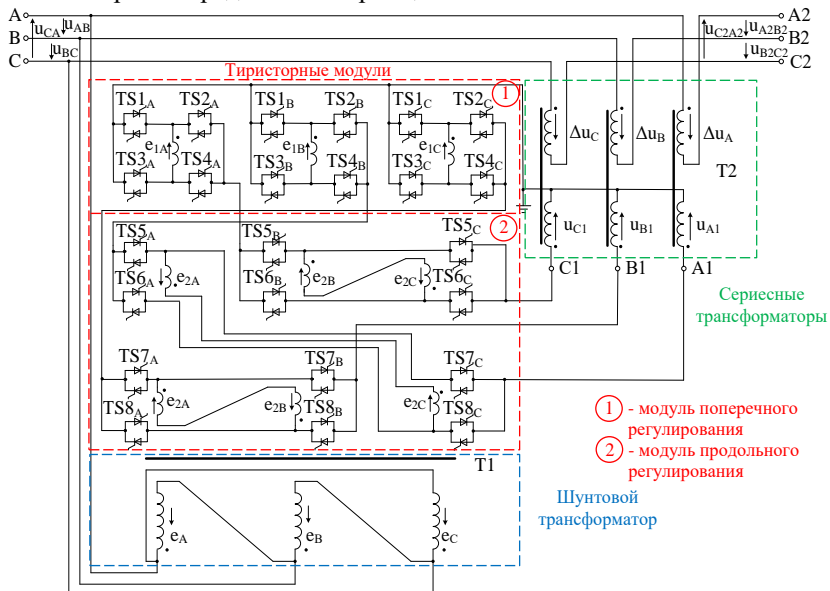


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части ТРН

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  $\Delta u$ , 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  $90^\circ$  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 рассечку 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  $\alpha$ .

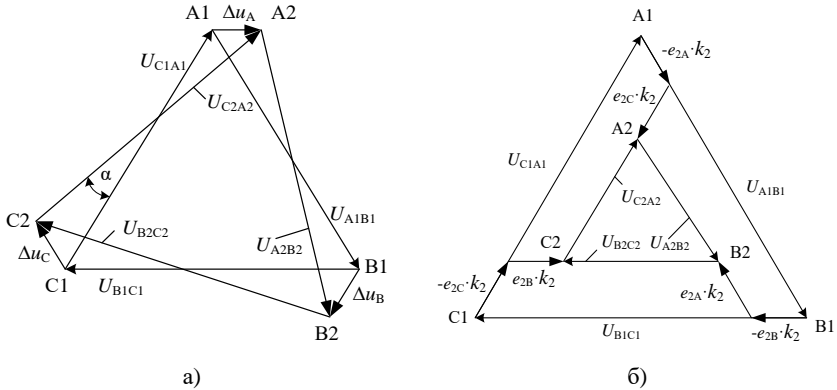


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений:  
в режиме запаздывания (а); в режиме понижения напряжения (б)

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  $\alpha$ .

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;  $\delta$  – 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, °	$\pm 5$
Дискретность изменения сдвига основной гармоники выходного напряжения, °	1,5
Диапазон регулирования амплитуды выходного напряжения относительно входного, %	$\pm 10$
Дискретность регулирования действующего значения выходного напряжения, %	$\leq 1,5$
Мощность нагрузки, кВА	$\leq 630$
Мощность шунтового трансформатора, кВА	106
Мощность серийных трансформаторов, кВА	$3 \times 28$

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.

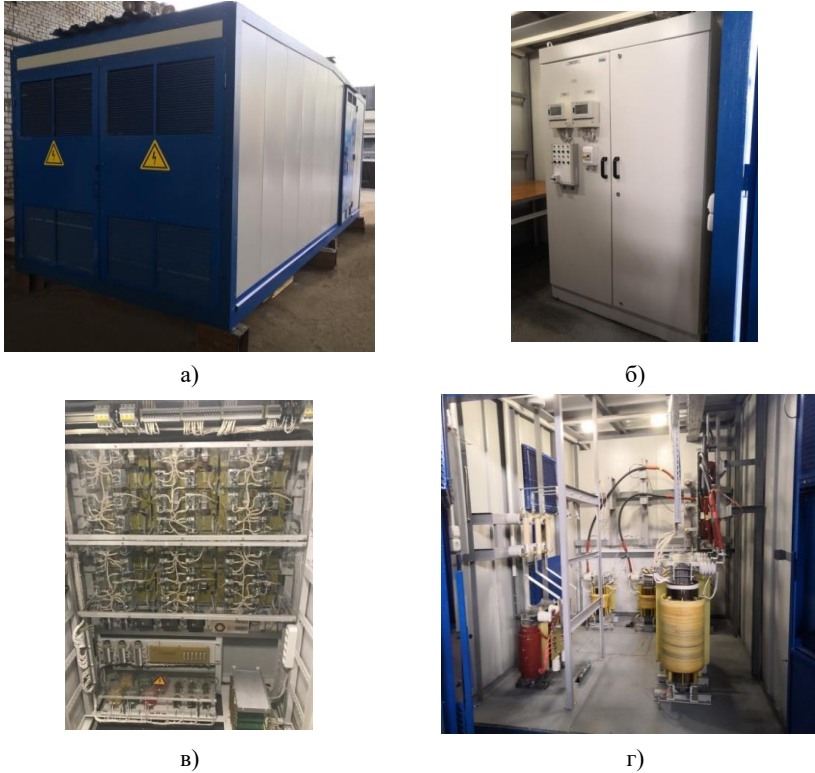


Рис. 3. Внешний вид экспериментального образца ТРН: общий вид (а); шкаф тиристорных коммутаторов (б); тиристорные модули (в); отсек силовых трансформаторов (г)

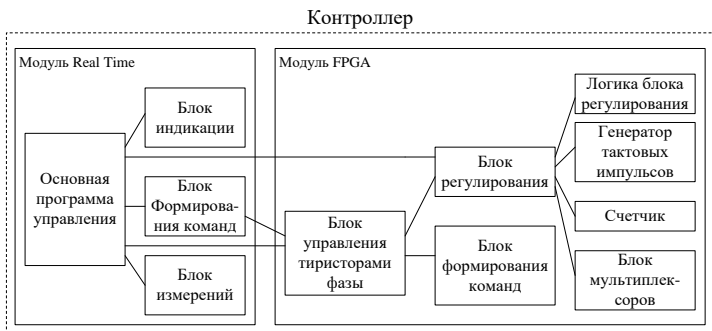


Рис. 4. Структурная схема программной части СУ 1 ЭО ТРН



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.

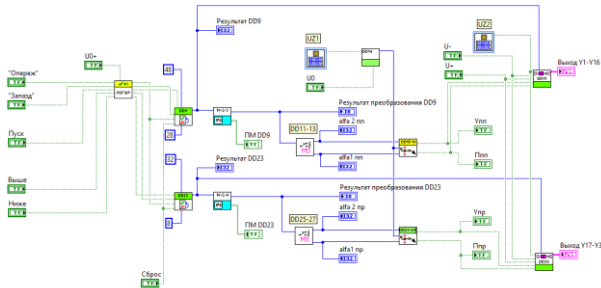


Рис. 5. Блок регулирования СУ 1 ЭО ТРН

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

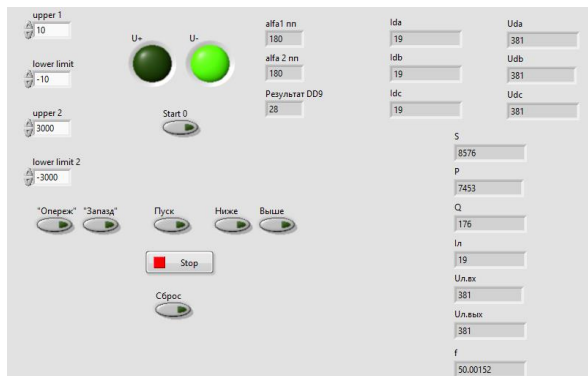


Рис. 6. Внешний вид панели управления СУ 1 ЭО ТРН

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.

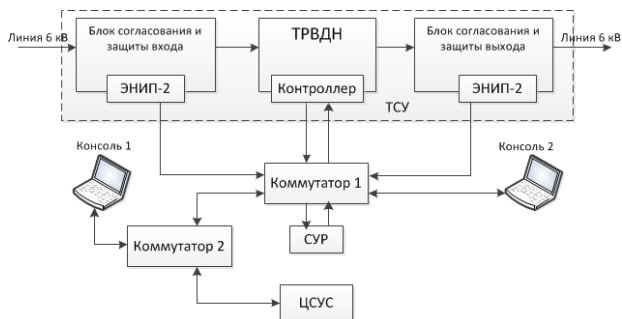


Рис. 7. Функциональная схема СУ 2 ЭО ТРН

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.

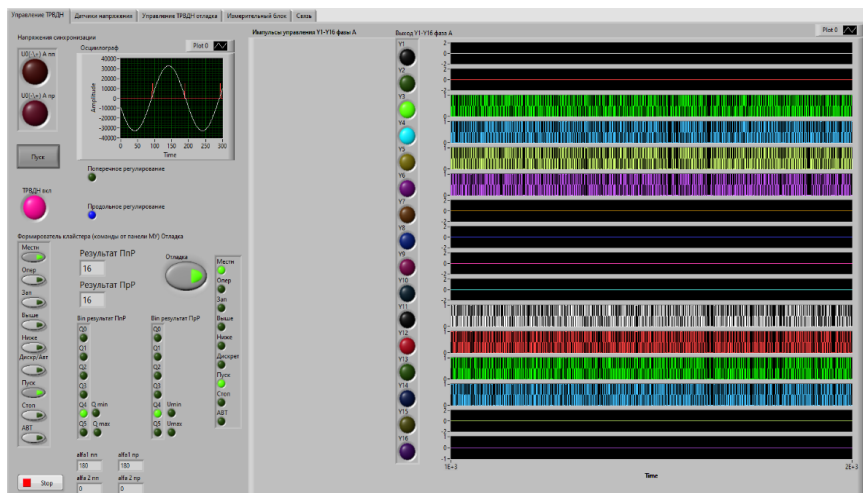


Рис. 8. Панель управления контроллера СУ 1 во время испытаний

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.

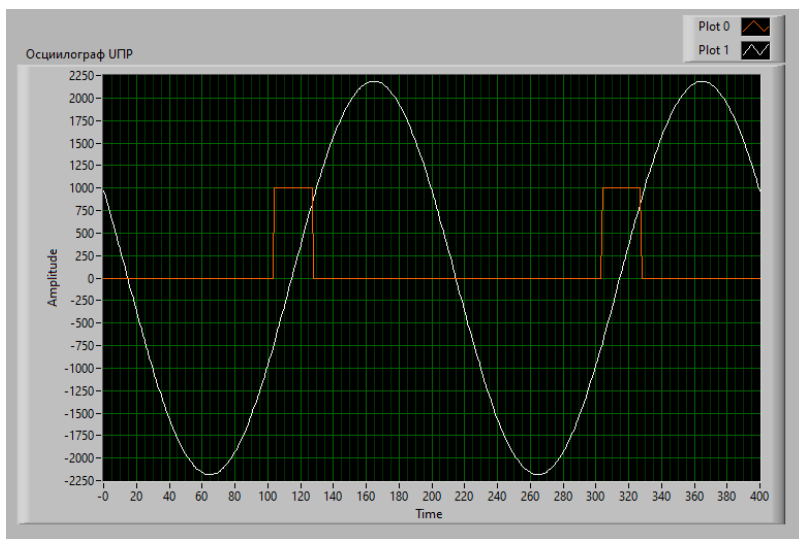


Рис. 9. Синхронизирующие импульсы, сформированные датчиком высокого напряжения при переходе синусоиды напряжения через ноль с отрицательного значения в положительное

### 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.

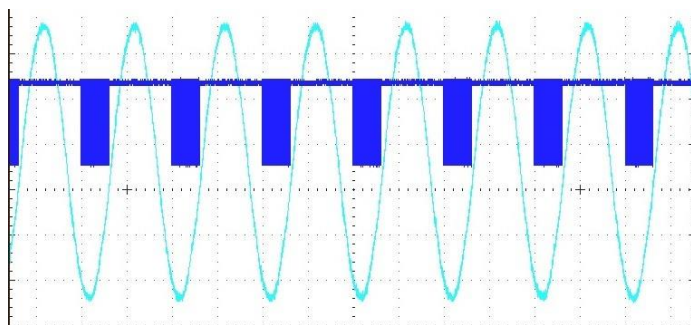


Рис. 10. Осциллограмма формирования импульсов управления на тиристоры и синхронизирующее напряжение фазы  $A$  в режиме продольного регулирования

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.

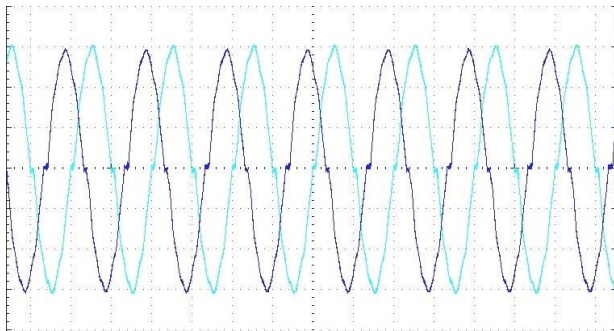


Рис. 11. Осциллограмма выходных напряжений фаз *A* и *C* в режиме продольного регулирования (режим понижения напряжения)

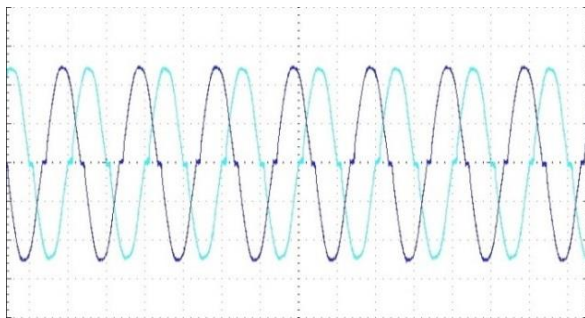


Рис. 12. Осциллограмма выходных напряжений фаз *A* и *C* в режиме поперечного регулирования (режим запаздывания)

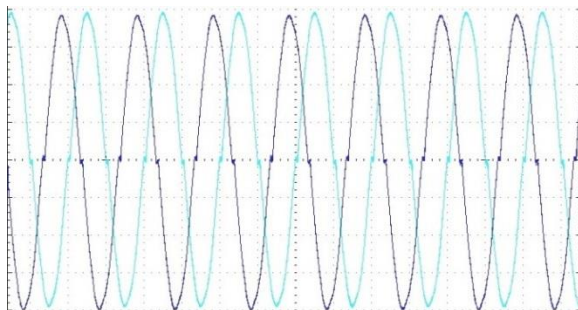


Рис. 13. Осциллограмма выходных напряжений фаз *A* и *C* в режиме продольно-поперечного регулирования (режим понижения напряжения и запаздывания)

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. Asabin**<sup>1</sup>, **E.N. Sosnina**<sup>1</sup>, **I.V. Belyanin**<sup>2</sup>, **E.V. Kryukov**<sup>1</sup>,  
**R.Sh. Bedretdinov**<sup>1</sup>, **V.M. Kovin**<sup>3</sup>

## **THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR EXPERIMENTAL RESEARCH**

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

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

<sup>3</sup> 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.