

УДК 621.31:004.45

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

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

¹Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева
²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

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

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

1. Введение

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

В НГТУ им. Алексеева разработан экспериментальный образец ти-

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

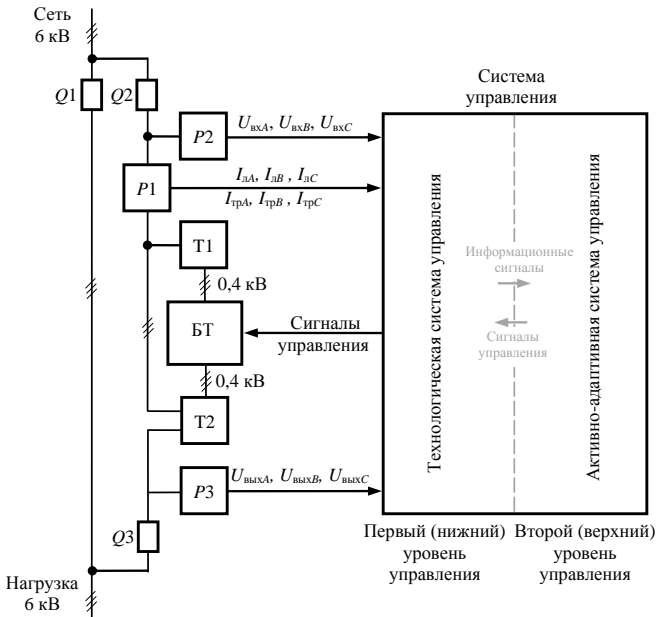


Рис. 1. Схема подключения ТРН к РЭС напряжением 6 кВ:

БТ – блок тиристоров; Т1 (Т2) – шунтовой (серийный) трансформатор; P1, P2, P3 – блоки датчиков тока, входных и выходных напряжений; Q1-Q3 – высоковольтные выключатели

Основными силовыми элементами ТРН являются: блок тиристоров (БТ), шунтовой Т1 и серийный Т2 трансформаторы. Блок тиристоров состоит из модулей продольного и поперечного регулирования. Модуль поперечного регулирования вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, сдвинутую на $\pm 90^\circ$ относительно фазного напряжения источника, что позволяет изменять активную мощность. Модуль продольного регулирования вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, совпадающую или находящуюся в противофазе с фазным напряжением источника. Это позволяет изменять реактивную мощность или стабилизировать напряжение сети.

Система управления ТРН является двухуровневой (рис. 1). Технологическая система управления (ТСУ) является системой управления первого уровня. Задачей ТСУ является формирование команд управления тиристорами БТ. Активно-адаптивная система управления (ААСУ) – система управления второго уровня. ААСУ выполняет функции мониторинга и дистанционного управления ТРН.

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

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

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

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

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

II. Описание алгоритма системы управления тиристорами ТРН

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

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

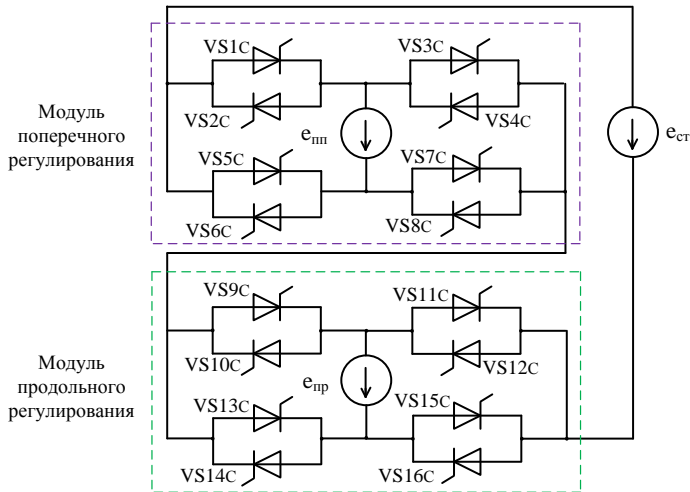


Рис. 2. Принципиальная схема модулей поперечного и продольного регулирования БТ (фаза С): VS1-VS16 – регулируемые тиристоры; $e_{шт}$ и $e_{ст}$ – ЭДС вторичных обмоток шунтового трансформатора; $e_{ст}$ – эквивалентная ЭДС, вводимая модулями регулирования

В блоках регулирования всех фаз углы переключения тиристоров принимают следующие значения: 40° , 60° , 75° , 90° , 105° , 120° , 140° , 180° . Эти значения находятся в ячейках постоянных запоминающих устройств, что увеличивает быстродействие регулирования [20]. При этом каждый поддиапазон регулирования напряжения (вольтодобавка или вольтоотбавка), составляющий 10 %, оказывается разделенным на восемь равных интервалов с шагом 1,3 %. Каждому номеру режима соответствует определенная комбинация углов переключения на повышение (α_1) и понижение (α_2) напряжения. Важно, что при переключении с одного уровня напряжения на другой отсутствует необходимость плавного последовательного прохождения всех промежуточных углов регулирования. При этом регулирование осуществляется дискретно равными ступенями по линейному закону.

III. Программная реализация алгоритма системы управления ТРН

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

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

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

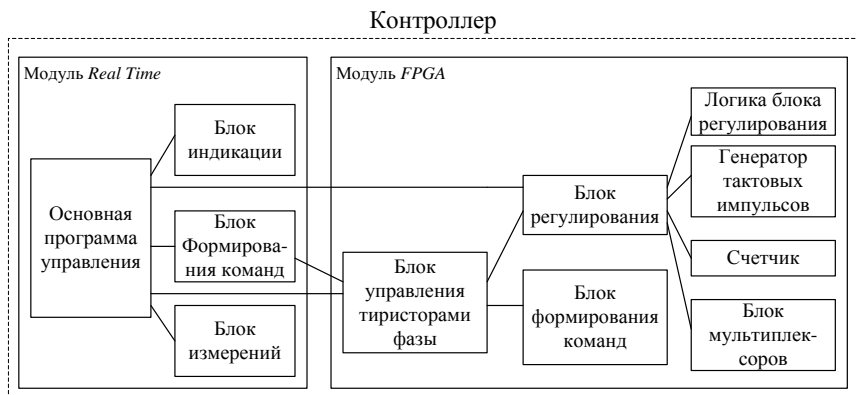


Рис. 3. Иерархия программы управления ТРН

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

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

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

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

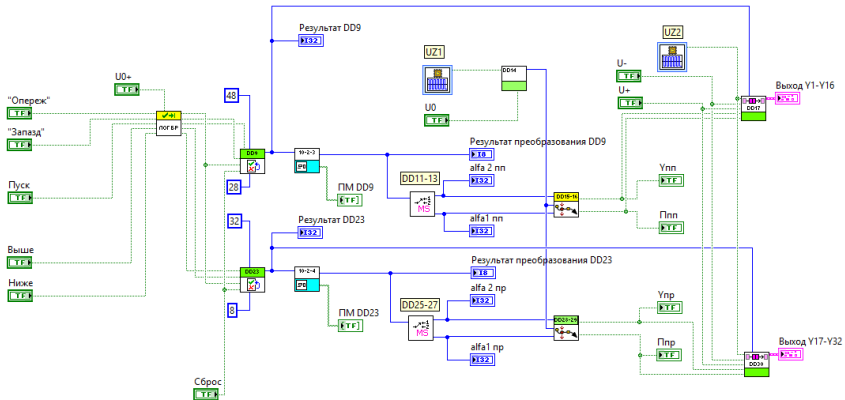


Рис. 4. Программная реализация блока регулирования

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

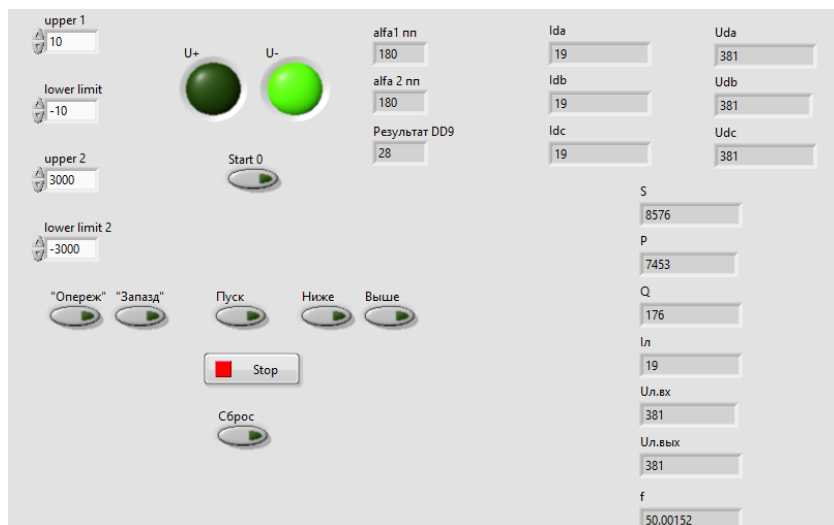


Рис. 5. Внешний вид панели управления

IV. Проверка работоспособности ТСУ ТРН

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

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

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

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

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

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

На рис. 9 показана осциллограмма формирования импульсов управления.

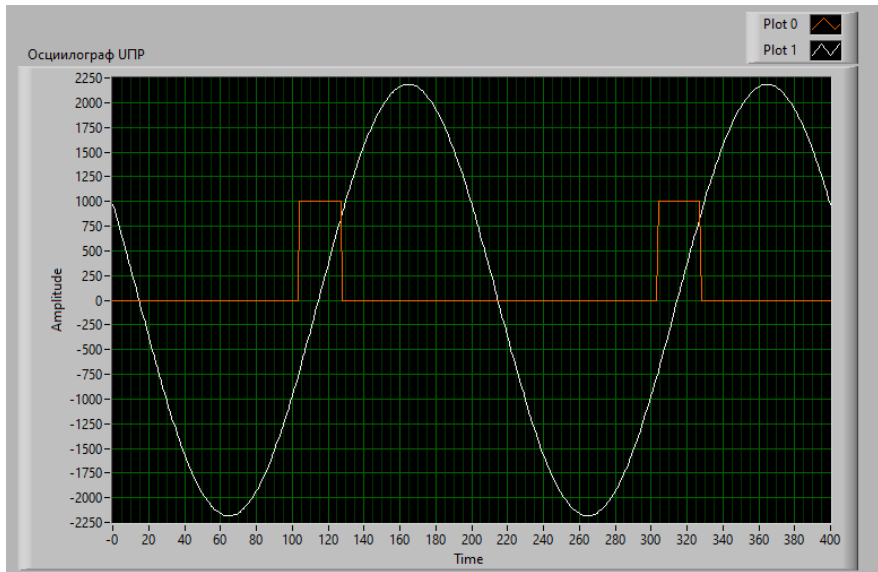


Рис. 9. Синхронизирующие импульсы, сформированные датчиком высокого напряжения, при переходе синусоиды напряжения через ноль с отрицательного значения в положительное

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

VI. Заключение

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

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

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

© Асабин А.А., 2020

©Белянин И.В., 2020

© Соснина Е.Н., 2020

©Бедретдинов Р.Ш., 2020

© Крюков Е.В., 2020

Библиографический список

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

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

**A.A. Asabin¹, I.V. Belyanin² E.N. Sosnina¹,
R.Sh. Bedretdinov¹, E.V. Kryukov¹**

CONTROL SYSTEM OF THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR

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

² National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

References

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

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