

УДК 621.3

А.А. Кралин, Е.В. Крюков, А.А. Асабин

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена принципам работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) для распределительных сетей при продольном, поперечном и продольно-поперечном способах регулирования напряжения. Принципы работы ТРВДН пояснены с использованием векторных диаграмм. Представлены технические решения силовой части ТРВДН.

Ключевые слова: тиристорный регулятор, вольтодобавочный трансформатор, продольное, поперечное, продольно-поперечное регулирование, фазоповоротное устройство.

Управление потоками мощности в электрических сетях осуществляется в настоящее время с использованием устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации к которым относятся фазоповоротные устройства, а также тиристорные регуляторы величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН). Напряжение на нагрузке в таких устройствах формируется из нескольких отрезков синусоид различной амплитуды [1-4]. Применение импульсно-фазового управления тиристорными ключами сопряжено с потреблением из питающей сети дополнительной реактивной мощности, а также наличием в кривых выходного напряжения и потребляемого тока высокочастотных гармонических составляющих. В связи с этим разработка ТРВДН с таким способом регулирования связана в основном с проблемами улучшения качества регулируемого напряжения, повышения коэффициента мощности и КПД.

Одним из направлений улучшения формы кривой регулируемого напряжения многоэлементных ТРВДН является применение вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ). Напряжение на первичной стороне ВДТ регулируется с помощью тиристорных ключей, а вторичная обмотка включается последовательно с сетью или вторичной обмоткой главного трансформатора. Это позволяет, во-первых, регулировать значительные мощности, во-вторых, достаточно просто согласовывать параметры регулируемой цепи с параметрами питающей сети.

Один из вариантов возможного решения силовой части тиристорного регулятора представлен на рис. 1. Схема содержит один вольтодобавочный трансформатор $TV1$. К входным зажимам ТРВДН подключены первичные обмотки вольтодобавочного трансформатора, соединенные по схеме «треугольник». Модули продольного и поперечного регулирования выполнены на базе секционированных вторичных обмоток трансформатора $TV1$. Данные модули включены последовательно между входным и выходным зажимами каждой фазы ТРВДН. Тиристорные ключи ТК1-ТК6 всех фаз образуют модули поперечного регулирования. Включение регулировочных секций в диагональ тиристорного моста позволяет реверсировать напряжение соответствующей ступени регулирования. Секции вторичных обмоток ВДТ, коммутируемые тиристорными ключами ТК7-ТК10, рассчитаны на напряжение $u_2=e_2$. Они образуют модули продольного регулирования. Модули поперечного регулирования исключаются из работы при включенных коммутаторах ТК5-ТК6 и выключенных ТК1-ТК4. В данном режиме выходные напряжения ТРВДН равны соответствующим входным напряжениям.

Проводящее состояние тиристорных ключей ТК4 и ТК5 реализует одну ступень поперечного регулирования. Поперечное регулирования напряжения фазы *A* осуществляется с помощью напряжения соседней фазы *B* пропорционального линейному напряжению $-u_{BC}$.

Формирование векторов напряжения поперечного регулирования фаз *B* и *C* осуществляется с помощью векторов пропорциональных напряжениям $-u_{CA}$ и $-u_{AB}$. На рис. 2а представлена векторная диаграмма для данного режима работы. Следует отметить, что поперечное регулирование напряжения при включенных коммутаторах ТК5 и ТК2 позволяет увеличить угол сдвига между входными и выходными напряжениями практически в 2 раза (рис. 2б).

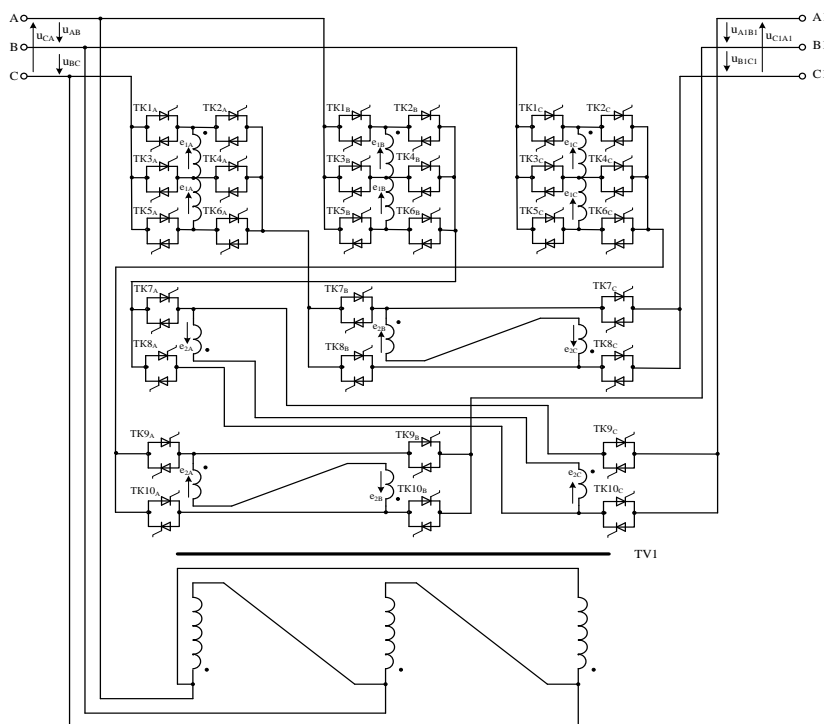


Рис. 1. Тиристорный регулятор напряжения с вольтодобавочным трансформатором

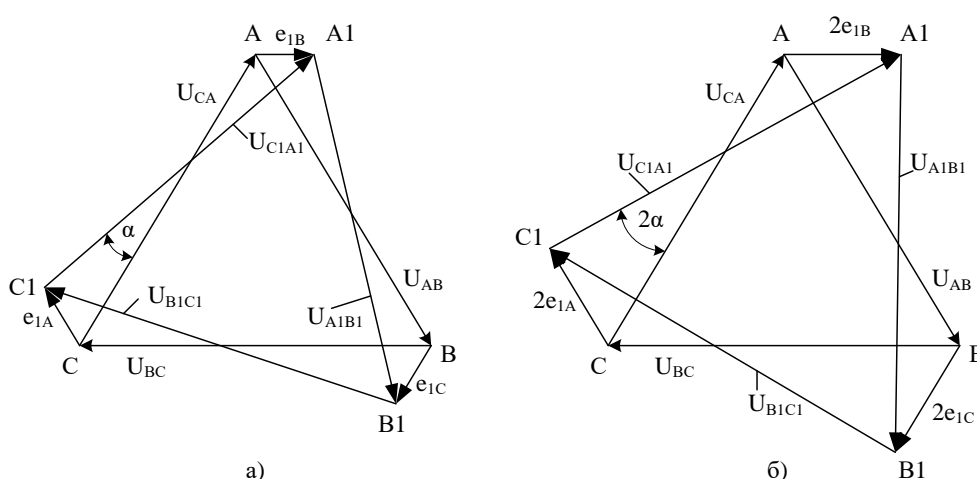


Рис. 2. Векторная диаграмма тиристорного регулятора при поперечном регулировании

Последовательное включение ТК3, ТК6 и ТК1, ТК6 позволяет получить на выходе ТРВДН напряжения, опережающие входные на углы α и 2α соответственно.

Следует отметить, что поперечное регулирование вызывает увеличение выходных линейных напряжений ТРВДН. Использование модулей продольного регулирования, выпол-

ненных на тиристорных ключах ТК7-ТК10, дает возможность стабилизировать выходные линейные напряжения по величине, а также обеспечить продольное регулирование. В диагональ тиристорного моста модуля продольного регулирования включены встречно – последовательно соединенные обмотки двух соседних фаз ВДТ.

В зависимости от режима работы тиристорных коммутаторов модуль продольного регулирования реализует три режима работы с синусоидальным выходным напряжением.

Вторичные обмотки ВДТ исключаются из работы при включенных коммутаторах ТК8_A, ТК 10_C, ТК 8_B, ТК 8_C, ТК10_A, ТК10_B. Выходные линейные напряжения ТРВДН равны соответствующим входным напряжениям.

Снижение выходного напряжения при продольном регулировании осуществляется путем ввода в соответствующую линию разности э.д.с. ступеней продольного регулирования. В линию фазы *A* при включенных тиристорных коммутаторах ТК8_A-ТК9_C вводится $e_{2C} - e_{2A}$, в линию фазы *B* при включенных ТК10_A-ТК9_B вводится $e_{2A} - e_{2B}$, в линию фазы *C* при включенных ТК8_B-ТК7_C вводится $e_{2C} - e_{2A}$. На рис. 3а представлена векторная диаграмма, поясняющая данный режим работы. Увеличение выходного напряжения ФПУ осуществляется путем коммутации тиристорных ключей ТК7_A, ТК10_C, ТК7_B, ТК8_C, ТК9_A, ТК10_B (рис. 3 б).

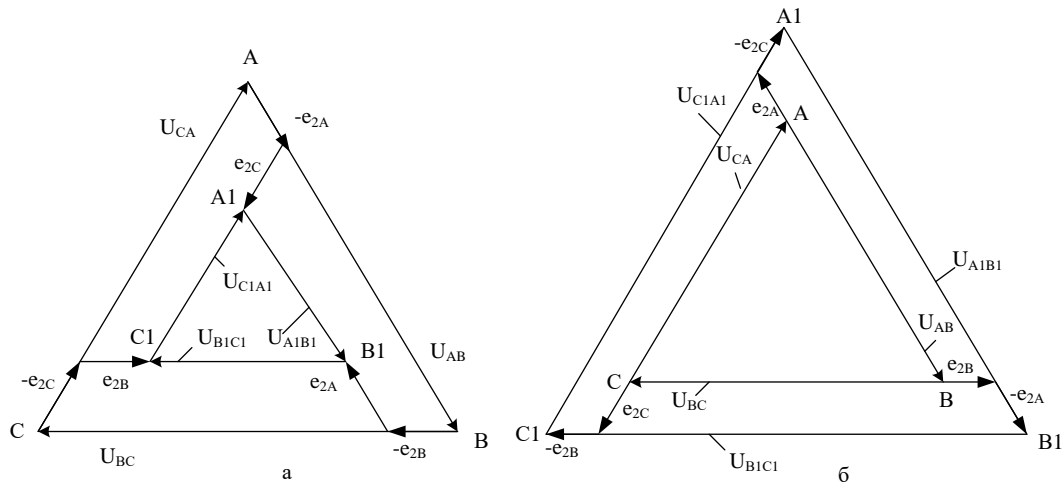


Рис. 3. Векторная диаграмма ФПУ при продольном регулировании

Следует отметить, что эффективное управление потоками мощности в распределительной электрической сети можно осуществить при совместном использовании модулей продольного и поперечного регулирования путем изменения величины и фазы выходного напряжения ТРВДН. В рассмотренной силовой схеме изоляция тиристорных коммутаторов находится под действием напряжения линии распределительной сети, что является существенным недостатком. Вопросы изоляции тиристорных коммутаторов в данном случае могут быть решены путем применения дополнительного согласующего трансформатора.

На рис. 4 представлена схема универсального ТРВДН для сетей среднего и высокого напряжения [3]. В отличие от схемы, представленной на рис. 1, в данном решении используется согласующий трансформатор. Тиристорные коммутаторы при этом вынесены в цепи вторичных обмоток шунтового трансформатора и находятся под низким напряжением. Кроме того, для работы устройства не нужно наличие заземленной нейтрали, что дает возможность использовать устройство не только в сетях высокого напряжения, но и в сетях низкого и среднего напряжения.

Как и в схеме, представленной на рис. 1, вторичные обмотки разбиты на равные секции, что облегчает коммутацию тиристорных коммутаторов. Модуль поперечного регулирования каждой фазы содержит одну регулировочную секцию, коммутируемую тиристорными ключами ТК1-ТК4. Использование только одной регулировочной секции в модуле поперечного регулирования упрощает конструкцию трансформатора и уменьшает количество тиристорных коммутаторов по сравнению со схемным решением, представленным на рис. 1.

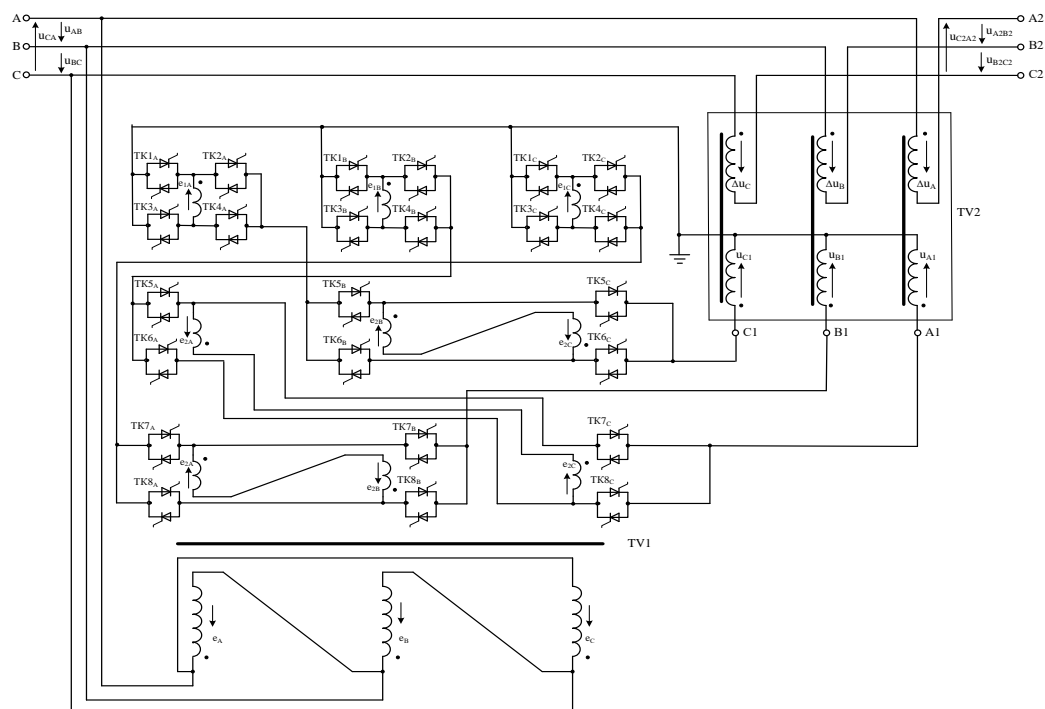


Рис. 4. Схема универсального ТВДН для сетей среднего и высокого напряжения

Необходимо отметить, что выбор оптимального коэффициента трансформации регулировочных секций обеспечивает необходимый диапазон регулирования выходного напряжения. Использование импульсно-фазового регулирования тиристорными ключами при совместном использовании модулей продольного и поперечного регулирования позволяет плавно регулировать величину и фазу выходного напряжения устройства во всем диапазоне [4]. При этом лучшими регулировочными характеристиками обладает алгоритм двухзонного управления тиристорными ключами. Указанный алгоритм устраняет возможность возникновения колебательных процессов, а также исключает нерегулируемые интервалы в выходном напряжении. Использование двухзонного поочередного управления тиристорными ключами с синхронизацией по моментам перехода напряжения сети через ноль реализует регулирование напряжения в интервалах положительного и отрицательного знака мощности. Регулирование напряжения в интервалах положительного знака мощности осуществляется путем изменения угла управления α_1 . Регулирование напряжения в интервалах отрицательного знака мощности выполняется путем изменения α_2 . Таким образом, регулирование углов управления α_1 и α_2 приводит к изменению выходного напряжения в пределах регулировочной ступени [4].

В качестве примера, поясняющего формирование выходного напряжения при продольном регулировании, на рис. 5 представлены схема замещения ТВДН, а на рис. 6 – временные диаграммы напряжений данного режима. Выходное напряжение ТВДН при продольном, поперечном и продольно-поперечном регулировании формируется на различных интервалах с помощью синусоидальных функций. Используя метод припасовывания разложив кривую выходного напряжения в ряд Фурье можно определить ее гармонический состав.

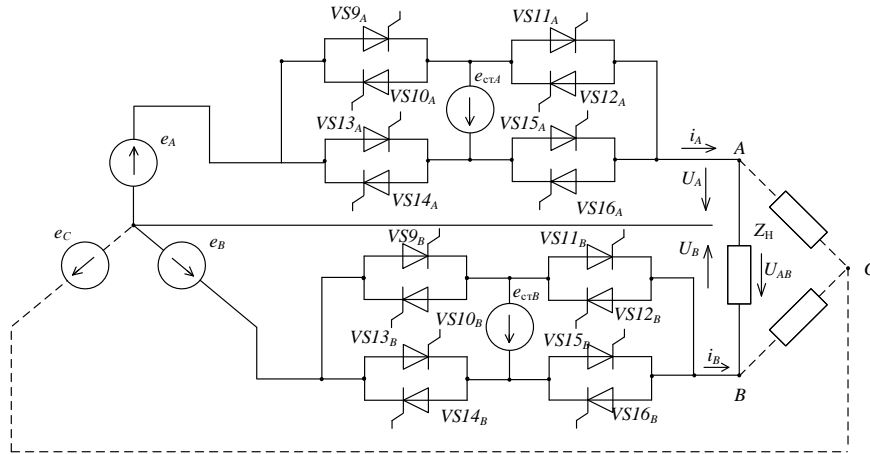


Рис. 5. Схема замещения ТРВДН при продольном регулировании выходного напряжения

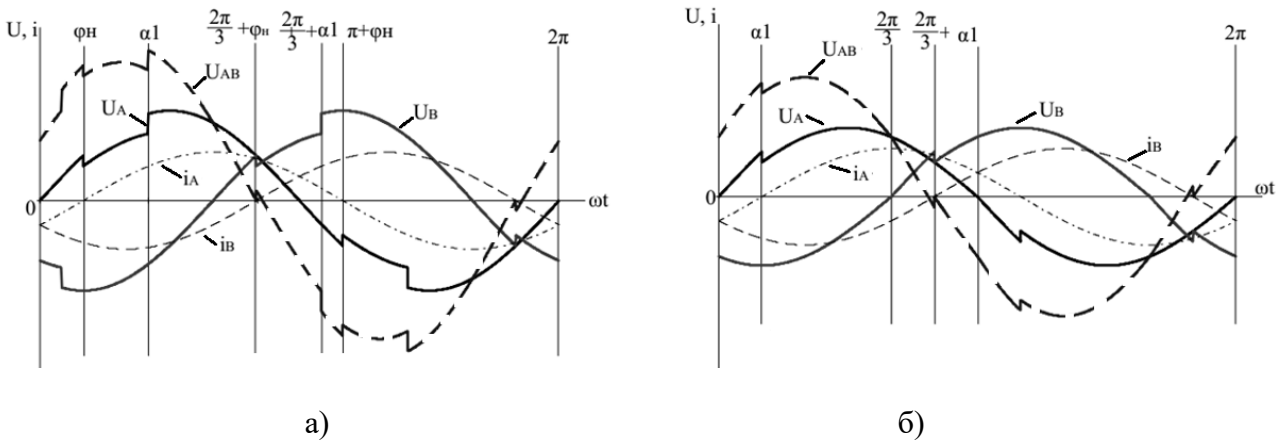


Рис. 6. Временные диаграммы работы ТРВДН при продольном регулировании в режиме:
 а) повышения напряжения при изменении α_1 ;
 б) понижения напряжения при изменении α_1

Следует отметить, что в спектре выходного напряжения отсутствуют постоянная составляющая и четные гармоники. Кроме того, в линейных напряжениях отсутствуют гармоники, кратные 3, так как они образуют систему напряжений нулевой последовательности. Кривая выходного напряжения с разложением до 15-й гармоники будет описываться выражением (1):

$$u_{выхAB}(t) = \sum_{n=1}^{15} B_n \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{15} A_n \cos n\omega t. \tag{1}$$

Коэффициенты B_n и A_n , определяются по формулам (2):

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{AB}(t) \sin n\omega t dt; \quad A_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{AB}(t) \cos n\omega t dt. \tag{2}$$

На рис. 7 в качестве примера представлены амплитудно-частотный (рис. 7а) и фазочастотный (рис. 7 б) спектры выходного напряжения ТРВДН при продольном регулировании в режиме понижения напряжения при $\alpha_1 = 70^\circ$ и угле нагрузки $\varphi = 30^\circ$.

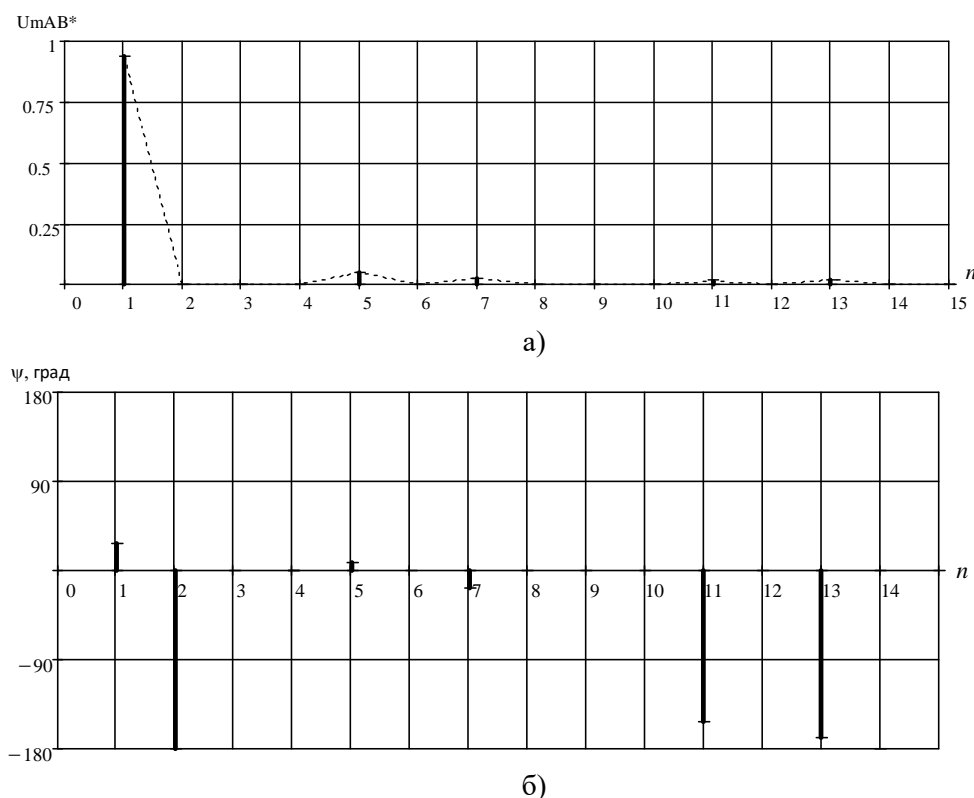


Рис. 7. Амплитудно-частотный и фазочастотный спектр выходного напряжения ТРВДН

Выводы

1. Управление потоками мощности в распределительных электрических сетях целесообразно выполнять с использованием тиристорных регуляторов величины и фазы вольтодобавочного напряжения.
2. Для улучшения качества регулируемого напряжения разрабатываемые устройства должны обладать возможностью импульсно-фазового управления тиристорами между соседними уровнями синусоидального выходного напряжения в целях реализации плавного регулирования величины и фазы напряжения во всем диапазоне.
3. В сетях 6-20 кВ целесообразно использовать дополнительный согласующий трансформатор, позволяющий вывести тиристорные коммутаторы модулей продольного и поперечного регулирования на сторону низкого напряжения.
4. Увеличение коэффициента трансформации регулировочных секций вызывает возрастание амплитуд высших гармонических выходного напряжения ТРВДН. Это требует выработки рекомендаций по их ограничению в пределах, определяемых ГОСТ в отношении качества электроэнергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6-20 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Р.Ш. Бедретдинов, А.А. Кралин // Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Проминжиниринг». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322-327.

2. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей, 2017. – С. 132-136.
3. Пат. на изобретение № 2621062. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. 2017. Бюл. №16.
4. **Асабин, А.А.** Энергетические показатели тиристорного регулятора переменного напряжения с вольтодобавочными трансформаторами при поочередном двухзонном управлении / А.А. Асабин, А.А. Кралин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 2. – С. 93-104.

*Дата поступления
в редакцию: 26.04.2019*

A.A. Kralin, E.V. Kryukov, A.A. Asabin

OPERATION PRINCIPLES OF THYRISTOR CONTROLLER MAGNITUDE AND PHASE OF THE BOOSTER VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article is devoted to the principles of operation of the thyristor regulator of the value and phase of the booster voltage for distribution networks with longitudinal, transverse and longitudinal - transverse voltage regulation method.

Design/methodology/approach: The operation principles of thyristor controller magnitude and phase of the booster voltage are explained using vector diagrams. Technical solutions of power circuit are presented.

Key words: thyristor regulator, booster transformer, longitudinal, transverse, longitudinal-transverse regulation, phase-shifting device.