

УДК 621.316.761, 62-533.6

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_68

БЛОК КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ, ПОВЫШАЮЩИЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.В. Бабенко

Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия
e-mail: vova.babenko.94@mail.ru

В.Н. Крысанов

ООО ПКФ «Современные Технологии»
Воронеж, Россия
ORCID: 0000-0003-1111-8402 e-mail: sovteh2000@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы реализации эффективного блока коммутации конденсаторов (конденсаторных батарей) установок компенсации реактивной мощности, использующих как электромеханические элементы коммутации, так и полупроводниковые ключи. С учетом рассмотренных критериев оптимального режима работы системы электроснабжения производственных объектов процесс компенсации реактивной мощности целесообразно реализовать с помощью управляемых конденсаторных установок. Предложены структура силовой части блока коммутации и алгоритм работы системы управления регулирующими конденсаторными установками, которые при меньшей стоимости полупроводниковых ключи, обеспечивают лучшие показатели качества электроснабжения и надежности.

Разработана блок-схема системы управления тиристорными ключами конденсаторных установок, работающих по принципу гибридного подключения конденсаторных батарей к сети и использующие дополнительные контакторные группы коммутации. На основе многофакторного анализа, проведено имитационное моделирование в программной среде *Matlab Simulink* для количественной оценки оптимальных параметров управляемой конденсаторной установки. На основании результатов моделирования, сделаны выводы о возможности существенного снижения затрат при компенсации реактивной мощности на производственных объектах, при правильном выборе мощности и числа ступеней регулирования конденсаторных установок. Рекомендовано использовать предложенные аппаратные и алгоритмические решения для реализации блоков коммутации тиристорных конденсаторных установок в промышленности для повышения их эффективности и сроков службы.

Ключевые слова: алгоритм, коммутация конденсаторов, компенсация реактивной мощности, система управления, тиристорные конденсаторные установки.

Для цитирования: Бабенко В.В., Крысанов В.Н. Блок коммутации конденсаторов, повышающий эффективность установок компенсации реактивной мощности // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 68-80.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_68

STATIC CONVERTER CONTROL ALGORITHMS INCREASING EFFICIENCY OF REACTIVE POWER COMPENSATION PROCESS

V.V. Babenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
e-mail: vova.babenko.94@mail.ru

V.N. Krysanov

LLC PKF “Modern Technologies”
Voronezh, Russia
ORCID: 0000-0003-1111-8402 e-mail: sovteh2000@mail.ru

Abstract. The article discusses the implementation of effective control algorithms for switching processes of reactive power compensation plants using both electromechanical switching elements and semiconductor keys. Taking into account the considered criteria of the optimal operation mode of the power supply system of production facilities, it is shown that the process of reactive power compensation should be implemented using controlled capacitor plants. The algorithm of operation of the control system of static devices of the thyristor capacitor plants is proposed, which at lower costs for semiconductor switches provides the main indicators of power quality and reliability.

A block diagram of a system for controlling thyristor keys of capacitor plants operating on the principle of hybrid switching of capacitor batteries to the network and using additional switching contactor groups has been developed. On the basis of the multiple-factor analysis, simulation modeling in the Matlab Simulink for quantitative assessment of optimum parameters of the operated condenser installation is carried out. Based on the simulation results, conclusions were drawn on the possibility of a significant reduction in costs when compensating for reactive power at production facilities, with the correct selection of capacity and the number of control stages of condenser plants. It is recommended to use the proposed algorithmic solutions for control systems of thyristor capacitor plants in industry to increase the efficiency of power equipment use, their service life and reduce power losses.

Keywords: algorithm, capacitor switching, control system, reactive power compensation, thyristor capacitor plants.

For citation: V.V. Babenko and V.N. Krysanov, “Static converter control algorithms increasing efficiency of reactive power compensation process”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 68-80, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_68

I. Введение

Задачи повышения энергоэффективности современных производств являются особенно актуальными на фоне постоянного роста стоимости энергоресурсов. Поэтому вопросы снижения непроизводительных потерь электроэнергии, значительная часть которых затрачивается на передачу реактивной мощности, требуют реализации современных, эффективных энергосберегающих технологий – таких как компенсация реактивной мощности (КРМ). Эти технологии весьма разнообразны как в аппаратном, так и в алгоритмическом аспекте своей реализации [1, 2].

В настоящее время существует большое разнообразие устройств КРМ, которые достаточно хорошо изучены и широко распространены в сегменте производственных предприятий. Наиболее распространенным устройством КРМ являются управляемые батареи статических конденсаторов (БСК).

Однако вопрос реализации устройств КРМ, отвечающего всем требованиям современных цифровых технологий по параметрам быстродействия, автоматизации, надежности, экономичности и других показателей, остается до сих пор в стадии постоянного развития.

Одним из вариантов решения данного вопроса может быть использование новых аппаратных и алгоритмических реализаций на базе уже существующих и хорошо зарекомендовавших устройств КРМ. Такой подход, как правило, менее затратен, чем разработка и реализация новых решений. Поэтому необходима реализация структуры силовой части и алгоритма управления установками КРМ, при котором коммутация емкости к сети электропитания происходит без бросков тока, перенапряжений и с минимальными затратами на силовые элементы установки [3-6]. Данные решения, в отличие от «классических» способов подключения конденсаторной батареи, основанных на использовании либо только электромагнитных контакторов, либо только полупроводниковых приборов, должны обеспечить эффективный комбинированный (гибридный) способ коммутации.

II. УКРМ с комбинированным блоком коммутации конденсаторной батареи

В данной статье предложен алгоритм управления блоком коммутации установки КРМ (УКРМ), реализующий эффективное использование как электромеханических элементов коммутации (контакторы, пускатели), так и полупроводниковые ключи. Структура силовой части гибридной установки приведена на рис. 1 [5]. В схеме не указаны элементы управления, коммутации, защиты, измерения и сигнализации типовых установок, например УКМ, УКМТ.

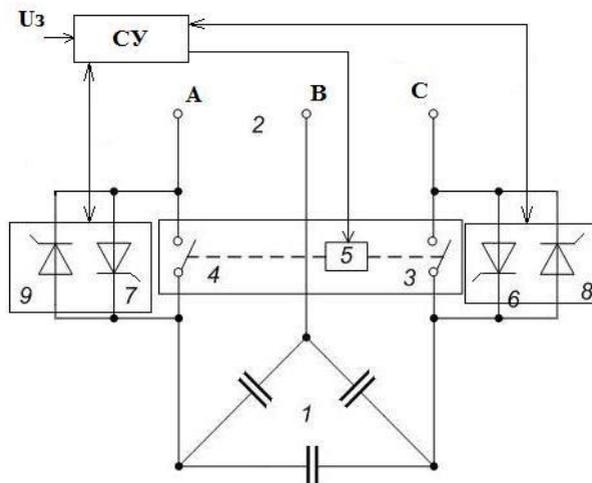


Рис. 1. Структура силовой части УКРМ с комбинированным блоком коммутации конденсаторной батареи

Fig. 1. The structure of the power section of a reactive power compensation unit with a combined switching unit of a capacitor bank

В типовых тиристорных УКРМ (широко применяемых для динамической компенсации реактивной мощности кранового, штамповочного, сварочного оборудования и т.д.), тиристорные ключи обеспечивают подключение БСК в течении всего периода компенсации, определяемой системой управления. При предлагаемой структуре блока коммутации и алгоритме управления тиристоры 6-9 подключают конденсаторную батарею 1 к сети 2 и находятся в проводящем состоянии в течение крайне малого времени всего периода компенсации (не более 0,01- 0,1 с, например, для контакторов серии КМ13, КТ12Р, пускателей ПМЕ, ПМА, ПМЛ), пока не оказываются шунтированными дополнительным контактором 3-5. Это обстоятельство позволяет осуществлять выбор силовых тиристоров (тиристорных модулей) не по значению номинального прямого тока, а по значению ударного тока. В соответствии с параметрами зависимости допустимого тока перегрузки от времени это значительно (в 5-10 раз) может снизить стоимость используемых силовых тиристоров (тиристорных модулей) [7, 8]. Пример зависимости допустимого тока перегрузки силового тиристора от времени включенного состояния приведен на рис. 2.

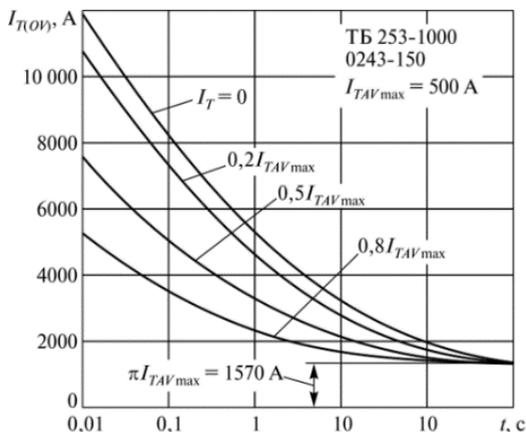


Рис. 2. Зависимость допустимого тока перегрузки силового тиристора (ТБ 253-1000.22) от времени включенного состояния
 Fig. 2. Dependence of the permissible overload current of the power thyristor (ТБ 253-1000.22) on the on-time

Широко применяемые для УКРМ тиристорные модули также имеют высокую перегрузочную способность. Так, силовые тиристорные модули SKKT, рассчитанные на рабочий ток 570 А (обратное импульсное напряжение до 1800 В), выдерживают в течении 0,01 с ток перегрузки 15500 А, $T_j = 135^\circ\text{C}$, а при $T_j = 25^\circ\text{C}$ – 19000 А. С учетом предварительной загрузки и режима охлаждения допустимые параметры ниже, но все же весьма значительны (табл. 1). Как видно из таблицы, технических параметров модуля SKKT на 570 А, для времени перегрузки 0,01-0,1 с допустимая кратность токов составляет от 6 до 20.

Таблица 1.
 Допустимые перегрузочные характеристики модуля SKKT

Table 1.
 Permissible overload characteristics of the SKKT module

Предварительная нагрузка			Допустимая амплитуда тока перегрузки, А, при длительности перегрузки, с				
$I_{T(x)}$, А	$P_{T(x)}$, Вт	t_n , °С	0,01	0,1	1,0	10	100
0	0	25	12 100	7800	5200	2580	1840
100	117,5	40,9	11 000	7260	4720	2400	1800
300	397,5	78,7	7600	5400	3400	2040	1700
400	560	100,6	5400	3560	2400	1800	1640

В то же время, использование тиристорного модуля при частых коммутациях конденсаторной батареи позволяет значительно повысить ресурс и самого электромагнитного контактора, отказавшись от дорогостоящих магнитных пускателей для коммутации емкостной нагрузки (все они выбираются с большим запасом по номинальному току и комплектуются дополнительными контактами с токоограничивающими резисторами для ограничения токов коммутации). Как вариант, при реализации предложенного алгоритма управления гибридной УКРМ в низковольтных сетях (0,4 кВ), возможно использовать вместо электромагнитного контактора твердотельное реле. Это позволит значительно повысить надежность экономичность всей системы в целом, полностью исключив механические элементы контактора [9].

III. Алгоритм работы системы управления

Принцип формирования структуры гибридной УКРМ с системой управления блоком коммутации на основе предложенного алгоритма показан на примере функциональной блок-схемы. На рис. 3 представлен упрощенный вариант без указания блоков управления, отвечающих за функции защиты, измерения, сигнализации.

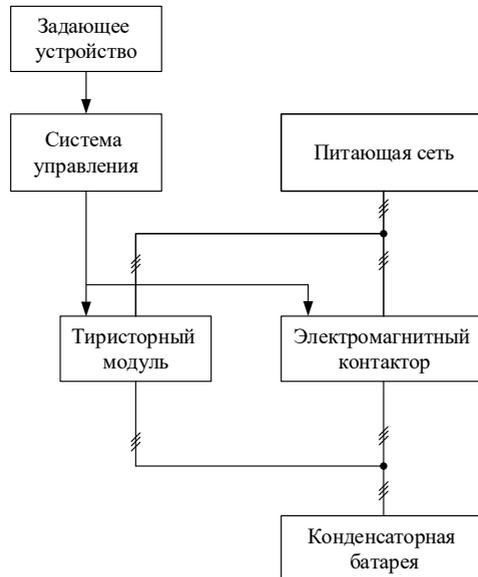


Рис. 3. Функциональная блок-схема гибридной УКРМ

Fig. 3. Functional block diagram of a hybrid reactive power compensation unit

Алгоритм работы системы управления односекционной (одноступенчатой) гибридной УКРМ (рис. 1) следующий.

При отсутствии сигнала на подключение к сети 2 конденсаторной батареи 1 от задающего устройства контакты 3, 4 электромагнитного контактора разомкнуты, а тиристорный модуль (тиристоры 7, 9 и 6, 8) заперт, то есть конденсаторная батарея оказывается отключенной от сети.

При поступлении сигнала на подключение от задающего устройства на вход системы управления происходит проверка состояния конденсаторной батареи. При отключенной конденсаторной батарее система управления осуществляет слежение и в момент нулевого напряжения на тиристорном модуле подает управляющие импульсы для открытия тиристоров. Далее происходит задержка на время t_1 , необходимое для полного отпирания тиристоров и подключения конденсаторной батареи к сети. После выдержки необходимого интервала времени система управления выдает сигнал на электромагнитный контактор для замыкания его контактов. Далее происходит задержка на время t_2 , необходимое для срабатывания контактора. После этого система управления перестает подавать сигналы на отпирание тиристоров, конденсаторная батарея остается подключена к сети через контактор.

При подаче сигнала на отключение конденсаторной батареи снова происходит проверка состояния батареи. При подключенной батарее система управления переходит в следящий режим и в момент нулевого напряжения на тиристорном модуле подает управляющие импульсы для открытия тиристоров. Далее происходит задержка на время t_1 , необходимое для полного отпирания тиристоров. В то же время электромагнитный контактор замкнут, таким образом, конденсаторная батарея остается подключенной и через контактор, и через тиристорный модуль. После выдержки необходимого интервала времени система управления снимает сигнал с контактора. Далее происходит задержка на время t_2 , в течение которого контакты размыкаются, оставляя конденсаторную батарею подключенной только через тиристорный модуль. После этого система управления перестает подавать сигналы на отпирание тиристоров, конденсаторная батарея отключается от сети. Данный алгоритм обеспечивает управление УКРМ с одной ступенью регулирования (одна секция конденсаторной батареи). Вход системы управления такой установки подключается к логическому выходу штатного измерителя-регулятора. При этом сигнал выставляется в логическую единицу при условии достижения уровня измеряемого параметра (ток нагрузки, давление воды в магистрали, уровень напряжения узла нагрузки и т.д.) определенной уставки. Обычно оно пропорционально значению потребляемой ре-

активной мощности конкретной нагрузки, которую необходимо скомпенсировать. Блок управления обрабатывает логический сигнал и выдает команду на подключение установки КРМ.

С точки зрения энергосбережения более эффективна работа конденсаторных УКРМ с несколькими ступенями регулирования. Для такого варианта алгоритм управления приведен на рис. 4.

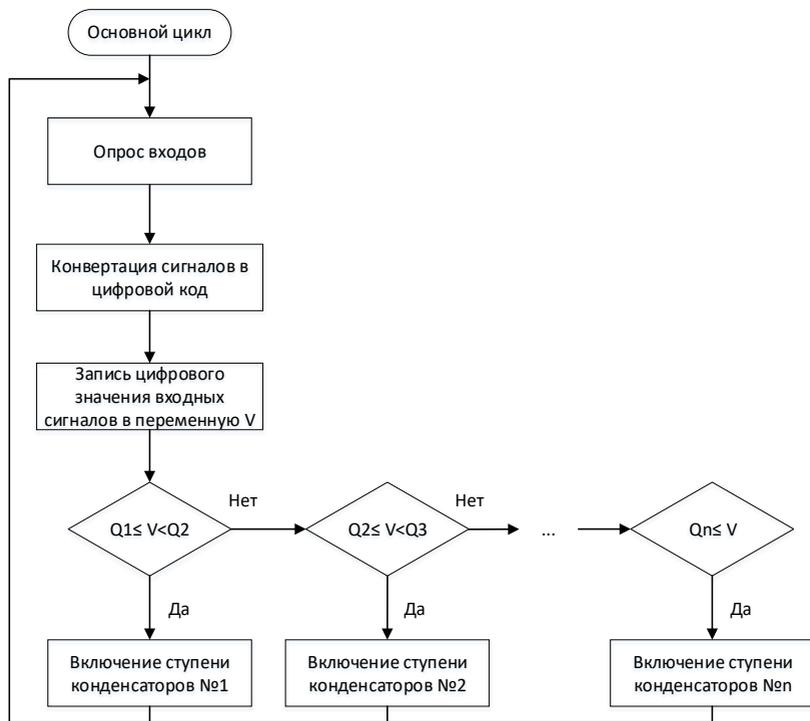


Рис. 4. Алгоритм работы многоступенчатой конденсаторной установки
Fig. 4. Algorithm of operation of a multistage reactive power compensation unit

Основной цикл включает в себя подключение основных элементов силовой части УКРМ, далее осуществляется съем информации на требуемый уровень КРМ с объекта (потребителя). Возможно получение информации с нескольких потребителей через несколько измерителей-регуляторов, далее она преобразуется в цифровое значение в зависимости от коэффициентов, характеризующих мощность каждого потребителя, и на ее основе выработывается команда на включение определенной секции установки КРМ.

На рис. 4 буквами Q_1, Q_2, Q_3, Q_n обозначены значения уставок для включения соответствующих секции установки.

При этом подключение выбранных ступеней происходит лишь после обязательного цикла срабатывания силовых элементов по алгоритму, описанному ранее для одноступенчатой УКРМ (рис. 1): «включение тиристорного модуля и контакторов выбранных ступеней» – «подключение выбранных ступеней к сети» – «включение контактора, шунтирующего тиристорный модуль» – «отключение тиристорного модуля» – «рабочий режим компенсации реактивной мощности». Рабочий режим длится до момента, когда требуется отключение ступеней КБ или изменение величины компенсируемой РМ. При этом последовательность отключения секций КБ обратная.

VI. Экономический эффект

Эффект энергосбережения при использовании УКРМ тем выше, чем больше ступеней регулирования при заданной величине компенсируемой реактивной мощности. Однако увеличение количества ступеней регулирования приводит к удорожанию УКРМ. При всех плюсах многоступенчатого регулирования РМ установки такого типа существенно дороже.

При определении оптимальных параметров установки КРМ необходимо учитывать тип потребителей электроэнергии, их мощности, график нагрузки, структуру системы электроснабжения, требования стандартов качества напряжения для конкретного производства. Наиболее часто руководствуются рекомендациями самих заводов-изготовителей УКРМ, в которых как правило используются упрощённые методики расчета. Поэтому целесообразным является использование автоматизированной методики расчета, основанной на критерии минимальных затрат и энергоэкономических характеристик потребителей [10].

В качестве основных определяемых параметров установки КРМ были приняты ее номинальная реактивная мощность и дискретность (количество ступеней регулирования). Для автоматизации данных расчетов был использован специально разработанный алгоритм в программе *Matlab* [11]. Пример результата расчета представлен в графическом виде на рис. 5 (промышленный вариант структуры нагрузки: 80 % – асинхронные двигатели, 20 % – осветительная нагрузка).

По вертикальной оси фиксируются данные годовых затрат (руб.), учитывающие стоимость установки КРМ, затраты на ее эксплуатацию и выплаты энергоснабжающей организации за некомпенсированную реактивную мощность. Цветом отмечены вариации уровня напряжения сети (0.9, 0.95, 1, 1.05, 1.1, 1.15 от U_n), а по горизонтальной оси – вариации числа ступеней регулирования конденсаторной установки (от 1 до 4). Анализ полученных результатов имитационного моделирования показывает достаточно сложную, многофакторную зависимость оптимальных параметров УКРМ

по критерию минимума совокупных затрат. Однако возможно дать качественную оценку для технико-экономического обоснования выбора конкретного варианта установки. Так, из рис. 5 очевидно, что для рассмотренных исходных данных целесообразно использовать батарею статических конденсаторов с 2 или 3 ступенями. При этом желательно обеспечить уровень фазного напряжения на низкой стороне потребителя в пределах 220-230 В.

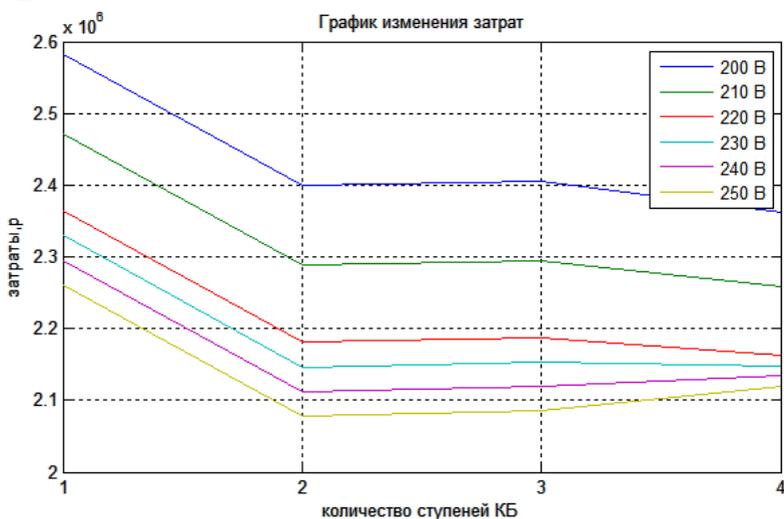


Рис. 5. Зависимости годовых затрат на компенсацию реактивной мощности от уровня напряжения и количества ступеней регулирования установки
 Fig. 5. Dependences of the annual costs for reactive power compensation on the voltage level and the number of control steps of the installation

V. Заключение

Вопросы повышения эффективности процессов снижения потерь активной мощности на производствах со значительным потреблением реактивной мощности целесообразно решать за счет алгоритмов управления статическими преобразователями. Предложенный алгоритм управления статической УКРМ позволяет обеспечить эффективную динамическую компенсацию за счет снижения стоимости, повышения надежности и срока службы силовых элементов.

Показаны результаты оптимизационного моделирования работы типовых производств (имеющих в качестве основной – асинхронную и осветительную нагрузку) по критерию минимума среднегодовых затрат, с учетом типа потребителей электроэнергии, их мощности, графика нагрузки,

структуры системы электроснабжения, требования стандартов качества напряжения. Определены оптимальные параметры УКРМ (мощность, число ступеней) и узла нагрузки.

Предложенную методику определения лучшего варианта установок компенсации целесообразно использовать на стадии проектирования систем электроснабжения предприятий для технико-экономического обоснования выбранного энергосберегающего оборудования.

Реализация предложенных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне широкого класса тиристорных конденсаторных установок для промышленных производств и распределительных сетей 0,4 кВ.

© Бабенко В.В., 2021

© Крысанов В.Н., 2021

Поступила в редакцию 01.11.2021

Received 01.11.2021

Библиографический список

- [1] Крысанов В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS. Воронеж: ВГТУ, 2016. – 232 с.
- [2] Крысанов В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. Воронеж: ВГТУ, 2017. – 234 с.
- [3] Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart grid (основные средства) // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 42-49.
- [4] Тайц А.А., Мешель Б.С. Регулирование напряжения и реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий. М., Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 224 с.
- [5] Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 3. С. 15-20. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-15-20
- [6] Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982. – 217 с.
- [7] Силовой тиристорный модуль SKKT // АС Энергия. [Электронный ресурс]. URL: <https://asenergi.com/catalog/moduli-silovye/modul-skkt.html> (дата обращения 01.09.2021).
- [8] Тиристор быстродействующий ТБ 253-1000-14, АС Энергия, 2018. – 7 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://asenergi.ru/pdf/tiristor/tb253/tb253-1000.pdf> (дата обращения 02.09.2021).
- [9] SCR output. Single phase SSR (200 to 400 A) // GREEGOO. [Электронный ресурс]. URL: http://www.greego.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html (дата обращения 02.09.2021).

- [10] Крысанов В.Н., Иванов К.В. Управление силовыми коммутационными элементами конденсаторной установки, Свид. о гос. рег. № 2017615137, заявл. 06.03.2017; опубл. 03.05.2017.
- [11] Крысанов В.Н., Иванов К.В. Определение оптимальных параметров конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности по критерию минимума затрат, Свид. о гос. рег. № 2017618141, заявл. 31.05.2017; опубл. 24.07.2017.

References

- [1] V.N. Krysanov, *Programmno-apparatnoe obespechenie sistem upravleniya EES na baze tekhnologii FACTS [Software and hardware of electric power systems control systems based on the FACTS technology]*. Voronezh: VSTU, 2016 (in Russian).
- [2] V.N. Krysanov, *Apparatno-programmnoe upravlenie rezhimami uzlov nagruzki regional'nyh setej elektrosnabzheniya s pomoshch'yu staticheskikh ustrojstv [Hardware and software control of load node modes of regional power supply networks using static devices]*. Voronezh: VSTU, 2017 (in Russian).
- [3] Yu.G. Shakaryan and N.L. Novikov, "Tekhnologicheskaya platforma Smart grid (osnovnye sredstva) [Technological platform Smart grid (fixed assets)]", *Energoekspert [Energy expert]*, no. 4, pp. 42-49, 2009 (in Russian).
- [4] A.A. Taitz and B.S. Meshel, *Regulirovanie napryazheniya i reaktivnoj moshchnosti v elektricheskikh setyah promyshlennykh predpriyatij [Regulation of voltage and reactive power in electrical networks of industrial enterprises]*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1960 (in Russian).
- [5] V.N. Krysanov, "Thyristor switched capacitor in energy efficient industrial power systems", *Energy Safety and Energy Economy*, iss. 3, pp. 15-20, 2017. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-15-20
- [6] O.G. Bulatov and A.I. Tsarenko, *Tiristorno-kondensatornye preobrazovateli [Thyristor-capacitor converters]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [7] Silovoj tiristornyj modul' SKKT [Power thyristor module SKKT]. [Online]. Available at: <https://asenergi.com/catalog/moduli-silovye/modul-skkt.html> [Accessed: Sept. 1, 2021] (in Russian).
- [8] *Tiristor bystrodeystvuyushchij TB 253-1000-14 [High-speed thyristor TB 253-1000-14]*, AS Energi. [Online]. Available at: <https://asenergi.ru/pdf/tiristor/tb253/tb253-1000.pdf> [Accessed: Sept. 2, 2021] (in Russian).
- [9] SCR output. Single phase SSR (200 to 400A). [Online]. Available at: http://www.greegoo.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html [Accessed: Sept. 2, 2021].
- [10] V.N. Krysanov and K.V. Ivanov, "Upravlenie silovymi kommutacionnymi elementami kondensatornoj ustanovki [Control of power switching elements of a capacitor plant]", Certificate of state registration no. 2017615137, May 03, 2017 (in Russian).
- [11] V.N. Krysanov and K.V. Ivanov, "Opredelenie optimal'nyh parametrov kondensatornoj ustanovki dlya kompensacii reaktivnoj moshchnosti po kriteriyu minimuma zatrat [Determination of optimal parameters of a condenser plant for compensation of reactive power according to the minimum cost criterion]", Certificate of state registration no. 2017618141, July 24, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бабенко Владимир Владимирович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Vladimir V. Babenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Крысанов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, директор ООО ПКФ «Современные Технологии», г. Воронеж, Российская Федерация.

Valery N. Krysanov, Cand. Sci. (Eng.), director of the LLC PKF “Modern Technologies”, Voronezh, Russian Federation.