

УДК 621.314.2 38, 62-83-52 (075)

В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, И.А. Хайченко

## Аппаратные решения для энергосберегающих технологий управления объектами распределительных сетей на базе силовых полупроводниковых устройств

Рассмотрены актуальные вопросы развития энергосберегающих технологий оптимального управления распределительных сетей по критерию минимума потерь электроэнергии за счет внедрения новых аппаратных средств управления их режимами на основе статических устройств. На основе анализа существующих аппаратных средств управления режимами распределительных сетей предложены разработанные схмотехнические решения силовой части и системы управления многофункционального тиристорного трансформаторного регулятора напряжения и гибридной тиристорной конденсаторной установки. Определены их основные технические характеристики и возможности по снижению асимметрии напряжения, ограничению токов короткого замыкания и регулированию реактивной мощности. Рекомендовано применение разработанных программных и аппаратных решений для широкого круга задач энергосбережения как в сфере электроэнергетики, так и на уровне промышленных объектов.

**Ключевые слова:** энергосбережение, распределительные сети, оптимизация управления, статические силовые регуляторы напряжения и реактивной мощности.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-91-96

Распределительные сети электроснабжения (СЭС) являются важнейшим звеном любой электроэнергетической системы (ЭЭС). Они представляют собой сложную многоуровневую структуру с большим количеством распределенных объектов с самыми разнообразными техническими и энергетическими характеристиками. Для полноценного и эффективного функционирования такой структуры необходимо обеспечение требуемого баланса выработки и потребления потоков энергетических мощностей. Последнее невозможно без оптимального управления режимами работы распределительных сетей электроснабжения по ряду критериев, таких как энергоэффективность, энергосбережение, качество ЭЭ, надежность энергоснабжения потребителей.

В соответствии с генеральной энергетической доктриной нашей страны, подобная модернизация распределительного электросетевого комплекса ЭЭС предусматривает создание «Интеллектуальных сетей» (Smart Grid) на основе комплекса аппаратных и программных средств, позволяющих оперативно и оптимально менять характеристики электрической сети [1].

В части аппаратной модернизации общепризнанным является направление, базирующееся на реализации технологической платформы FACTS [2–4].

Большинство предлагаемых аппаратных средств управления режимами распределительных сетей лежат в плоскости применения статических преобразователей регулирования напряжения и реактивной мощности.

Основные варианты аппаратной реализации этой платформы обладают многофункциональностью, имеют высокую эффективность, но весьма дороги.

В основу решения вышеуказанной задачи был положен выбор аппаратных средств управления режимами распределительных сетей СЭС, способных

реализовать заданные функции регулирования напряжения и реактивной мощности, при использовании минимального количества силовых полупроводниковых элементов (например, тиристоров).

В современной электроэнергетике основные аппаратные средства реализации технологической платформы FACTS представлены статическими и электромашинными устройствами [5–10].

К статическим устройствам относятся:

– батареи статических конденсаторов (БСК), шунтирующие реакторы (ШР), реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ), обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности [11];

– управляемые шунтирующие реакторы (УШР);

– статические тиристорные компенсаторы (СТК);

– статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на базе преобразователей напряжения на современных мощных IGBT-транзисторах – СТАТКОМ [12–14].

К электромашинным устройствам относятся:

– трансформаторные регуляторы напряжения (ТРН) [15,16];

– синхронные компенсаторы (СК);

– асинхронизированные компенсаторы (АСК).

Наиболее распространенными электромашинными аппаратами в технологии передачи электроэнергии на переменном токе, являются трансформаторы / автотрансформаторы. Но, как правило, трансформаторные устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) не отвечают современным требованиям концепции Smart Grid, так как используют электромеханические коммутаторы.

Поэтому видится целесообразность замены последних на полупроводниковые силовые ключи (например, тиристоры) и широкого использования тиристорно-трансформаторных регуляторов напряжения (ТТРН). Однофазная структурная схема ТТРН приведена на рис. 1 [17].

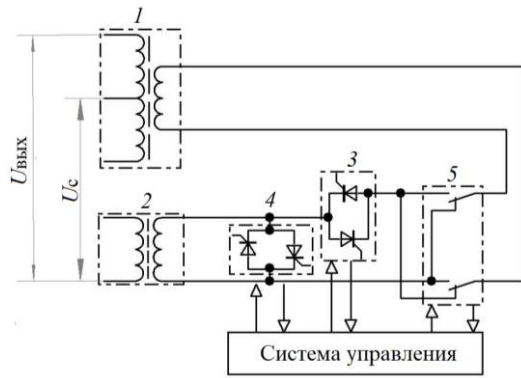


Рис. 1. Структурная схема ТТРН

Силовая часть ТТРН состоит из автотрансформатора (АТ) – 1, вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) – 2 и тиристорного регулятора, содержащего 2 группы тиристоров (3 и 4).

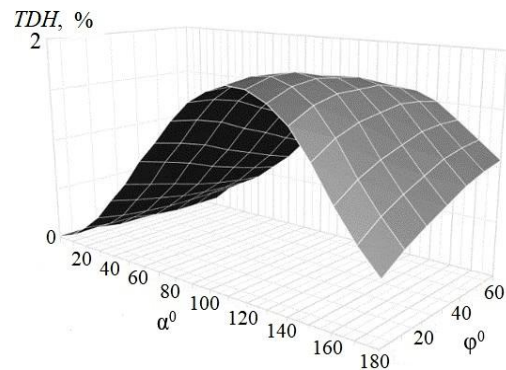
Применение ТТРН вместо устройств РПН, наряду с повышением надежности, позволяет реализовать плавное, быстродействующее регулирование напряжения.

Эти качества позволяют увеличить пропускную способность линий электропередач за счет повышения запасов статической и динамической устойчивости рассматриваемых систем. Разработаны алгоритмы для системы управления тиристорных групп (3 и 4), которые обеспечивают повышение диапазона регулирования, надежности, снижение весогабаритных показателей и многофункциональное применение ТТРН (например, снижение асимметрии напряжения, регулирование потребления реактивной мощности и ограничение токов КЗ в аварийных режимах работы ЛЭП) [18, 19]. Проведено имитационное моделирование ТТРН в среде Matlab Simulink для анализа основных характеристик, а именно: диапазона регулирования, гармонического состава выходного напряжения, дополнительных потерь в силовом оборудовании от высших гармоник. Расчеты, проведенные с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора (использовались программы «Fast fourier transform», «LabVIEW», «LTSpice», «powergui», «Hysteresis design tool»), показали, что коэффициент гармонических искажений ( $TDH$ ) фазного напряжения не превышает 8,5–10%, а линейного – 0,5–2% [20].

Установлено, что для обеспечения допустимых по ГОСТ-32144–2013 пределов нелинейных искажений напряжения (для фазного  $TDH=5-7\%$ ), целесообразно выбрать принцип двухзонного регулирования, реализуемый реверсивным переключателем 5. На рис. 2 показана зависимость  $TDH$  (%) линейного напряжения имитационной модели ТТРН от изменения угла регулирования  $\alpha$  и угла нагрузки  $\varphi$ .

Проведенный анализ дополнительных потерь в силовых полупроводниковых ключах и от высших гармоник (раздельно, в стали и меди обмоток трансформатора и ВДТ) показал, что по первой позиции они не превышают 2–3% от потребляемой мощности. По второй позиции, в зависимости от

режима работы ТТРН, суммарные потери могут достигать до 8%, что требует учета дополнительных потерь от высших гармоник в ТТРН [21].

Рис. 2. Зависимости  $TDH$  линейного напряжения от  $\alpha^0$ ,  $\varphi^0$ 

Проведенное имитационное моделирование позволяет дать следующую количественную оценку дополнительных (кроме регулирования напряжения) функциональных возможностей предлагаемого аппаратного решения.

В режиме работы ТТРН «симметрирование», максимальные значения токов обратной и нулевой последовательностей, которые могут быть компенсированы, составляют соответственно 7 и 11% при принятом 10%-м диапазоне регулирования выходного напряжения [21].

В режиме работы ТТРН «ограничение токов короткого замыкания» СУ реализуется алгоритм управления тиристорными ключами, обеспечивающий его перевод в режим управляемого увеличения индуктивного сопротивления АТ и ВДТ (вплоть до дроссельного режима ВДТ). При этом возможно снижение токов КЗ до 23% и перенапряжений до 40% в аварийных режимах распределительных сетей СЭС.

В режиме работы ТТРН «регулирование реактивной мощности», силовой автотрансформатор способен увеличить потребление реактивной мощности с 0,3...0,5 до 20...30% от  $S_n$  [17, 21]. При этом потери активной мощности в АТ дополнительно увеличиваются до 1,5% от  $S_n$ . Однако, учитывая тепловую перегрузочную способность трансформатора, целесообразно осуществлять режим регулирования потребления реактивной мощности при загрузке АТ до 0,7  $P_n$ , что ограничивает возможность полного отказа от шунтирующих реакторов.

Более того, необходимость генерации добавочной реактивной мощности индуктивного характера ограничена, как правило, начальным периодом эксплуатации линий электропередач и их малой нагрузкой. Гораздо более востребована генерация добавочной реактивной мощности емкостного характера.

Поэтому от большинства устройств регулирования реактивной мощности требуется выполнение именно этой функции. Как было отмечено выше, варианты ее аппаратной реализации в настоящее время весьма разнообразны, хорошо исследованы и широко применяются на практике. В свете реализации концепции Smart Grid, весьма перспективны

статические тиристорные компенсаторы СТАТКОМ и тиристорные конденсаторные установки (при необходимости динамической компенсации). С учетом их высокой стоимости в основном сейчас применяются управляемые и неуправляемые батареи статических конденсаторов БСК. Последние, обладая невысокой удельной стоимостью, простотой и надежностью, способны решать многие задачи компенсации. Однако все возрастающие требования по энергосбережению, параметрам управляемости (например, быстродействие, наработка на отказ) и высокий современный уровень силовой преобразовательной техники требуют создания новых силовых устройств компенсации реактивной мощности по критерию «цена–качество». В качестве такого аппаратного решения предложена гибридная тиристорная конденсаторная установка (ТКУ) [11]. Последняя, сохраняя все положительные качества регулируемой БСК, способна обеспечить эти устройства повышенной надежностью и новыми функциональными возможностями в случае, когда необходимо осуществлять компенсацию реактивной мощности нагрузки с частотой подключения до 100 циклов в сутки. Особенно их можно рекомендовать для высоковольтных сетей, где нет жесткой необходимости частых переключений БСК. Силовая часть такого ТКУ содержит две группы встречно-параллельно управляемых вентилях 3, 4 для подключения трехфазной конденсаторной батареи 1 (вариант односекционной БСК приведен на рис. 3).

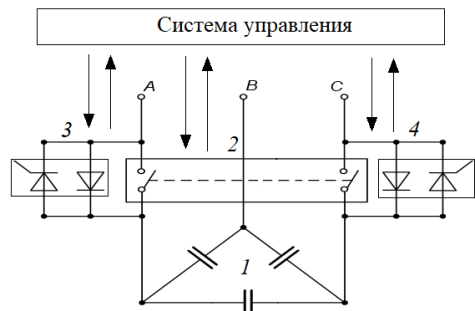


Рис. 3. Структурная схема гибридной ТКУ

Разработанная СУ обеспечивает безбросковое (по току) подключение батареи к сети [16]. С целью снижения установленной мощности (а соответственно и стоимости) и повышения ресурса работы тиристорных ключей в данном устройстве используется контактор (выключатель) 2, причем его силовые контакты подключены параллельно вентильным ключам и шунтируют их в установившемся режиме. После коммутации тиристоров и достижения установившегося состояния тока в сети тиристоры закорачиваются контактором. Используя свойства тиристора кратковременно выдерживать токовые перегрузки, последний выбирается не по номинальному току, а по току перегрузки (зависящего от шунтирования его контактором). В этом случае стоимость силового тиристорного блока значительно снижается. Эффективность применения такой гибридной ТКУ растет с увеличением числа секций БСК. Одна-

ко экономически целесообразно ограничить число секций БСК до 2–4. Данный вывод сделан на основании проведенных оптимизационных расчетов (критерий – минимальные затраты на компенсацию реактивной мощности) по определению двух основных параметров БСК – их реактивной мощности и требуемой дискретности регулирования при варьировании параметров напряжения и реактивной мощности в узлах нагрузки [22].

Результаты расчетов, для наглядности и удобства анализа, приведены в виде трехмерных графических зависимостей суммарных затрат  $C$  (руб.) на компенсацию реактивной мощности от напряжения  $U$  (В) (у конечного потребителя 190–260 В) в контрольной точке рассматриваемого узла нагрузки и количества ступеней  $n$  (1–4) гибридной ТКУ (рис. 4).

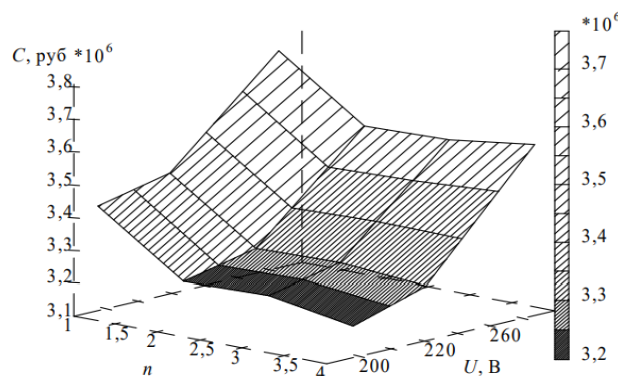


Рис. 4. Зависимость суммарных затрат на компенсацию реактивной мощности в узле нагрузки от параметров гибридной ТКУ

Все основные схмотехнические решения силовой части и системы управления разработанных ТТРН и гибридной ТКУ были апробированы на физических низковольтных моделях. Получено подтверждение работоспособности последних при их работе с типовыми нагрузками СЭС (асинхронный ЭП, системы ПЧ–АД, тепловые пункты) [23].

#### Заключение

1. Для успешной реализации концепции Smart Grid в отечественной электроэнергетике требуется совершенствование технологий энергосбережения для распределительных сетей электроснабжения в аппаратном направлении.

2. В основе технологий энергосбережения распределительных сетей электроснабжения должны лежать принципы оптимизации режима управления ими по критерию минимума потерь электроэнергии, а в узлах нагрузки с учетом энергоэкономических характеристик основных потребителей электроэнергии данных объектов.

3. Целесообразно применение новых аппаратных решений силовой части и алгоритмов для системы управления тиристорно-трансформаторных регуляторов напряжения и гибридных тиристорных конденсаторных установок в распределительных сетях электроснабжения.

4. Программа ЭВМ по определению оптимальных параметров (мощности отдельных секций, ко-

личество секций) батарей тиристорных конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и алгоритмов работы их системы управления (время включения, уставки включения) позволяет минимизировать потери электроэнергии в узлах нагрузки с учетом конкретных типов нагрузки в каждом узле.

5. Работоспособность предложенных аппаратных решений ТТРН и гибридной ТКУ подтверждены в рамках проведенных исследований на физических моделях.

#### Литература

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / Ю.Г. Шакарян, Ю.И. Моржин, В.В. Дорофеев, В.Е. Фортов. – М., 2015. – 238 с.

2. Hua H. Towards intelligent energy control and optimization in energy internet: a review / H. Hua, J. Cao // International conference on energy internet (ICEI). – 2019. – P. 573–578.

3. Cheng L. Energy internet: concept and practice exploration / L. Cheng, N. Qi, F. Zhang, H. Kong, X. Huang // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). – 2017. – P. 1–5.

4. Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / G. Narain, Hingorani, Gyugyi Laszlo. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

5. Interline power flow controller (IPFC) characterization in power systems / N.A. Hussein, A.A. Eisa, H.M. Mahmoud, S.A. Shehata, A. Othman // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – No. 7(3). – P. 1656–1665.

6. Kumbhare P.P. Application of Distributed Static Series Compensator for Improvement of Power System Stability // Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 718. – P. 27–34.

7. Наумов В.А. От автоматизированной электроэнергетики к интернету энергии / В.А. Наумов, В.А. Матисон // Энергия единой сети. – 2019. – № 2(44). – С. 36–44.

8. Степанов В.Н. Использование силовых устройств с управляемыми полупроводниковыми преобразователями на объектах электроэнергетики // Электроэнергетика: сегодня и завтра. – 2013. – № 2. – С. 65–68.

9. Постолатий В.М. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 7–14.

10. Sakib N. A Qualitative Study on the United States Internet of Energy: A Step Towards Computational Sustainability / N. Sakib, E. Hossain, S.I. Ahamed // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 69003–69037.

11. Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 3. – С. 15–20.

12. Милютин А.Ю. Компенсация реактивной мощности с помощью Статком / А.Ю. Милютин, Е.А. Темников, П.А. Готфрид // Научный форум «Технические и физико-математические науки»: сб. статей по матер. X междунар. науч.-практ. конф. – М.: МЦНО, 2017. – С. 122–129.

13. Обязуев А.П. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей и

линий электропередачи / А.П. Обязуев, В.Н. Кочкин. – М.: ВНИИЭ, 2002. – 15 с.

14. Okon T. WLS State Estimation in Polar and Rectangular Coordinate Systems for Power System with UPFC: Significance of Types of Measurements / T. Okon, K. Wilkosz // Acta Energetica. – 2013. – Vol. 1, No. 14. – P. 114–119.

15. Pat. 3621374. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer / Kestler Clarence J. (USA). – 1971.

16. Pullawar P.V. Notice of removal: real time voltage sag mitigation: new topologie / P.V. Pullawar, S.R. Paraskar, S.S. Jadhao // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. – 2015. – Vol. 2 (6). – P. 164–168.

17. Пат. 2612621, С2 РФ, МКП G 05F 5/04. Регулятор переменного напряжения / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов (РФ). – № 2014145372; заявл. 11.11.2014; опубл. 09.03.2017, Бюл. № 7. – 9 с.

18. Krysanov V.N. Reduction of Active Power Loss at 110/220 kV Node Substations Using Fuzzy Controller / V.N. Krysanov, V.L. Burkovsky, A.D. Danilov // Problemele energeticii regionale. – 2019. – Vol. 1 (39). – P. 57–69.

19. Пат. №2713739, С1, РФ, МКП G 05F 1/30. Регулятор переменного напряжения / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов, К.В. Иванов (РФ). – № 2019113982; заявл. 06.05.2019; опубл. 07.02.2020, Бюл. № 4. – 9 с.

20. Крысанов В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 244 с

21. Крысанов В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS. – Воронеж: ВГТУ, 2016. – 232 с.

22. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017618141. Определение оптимальных параметров конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности по критерию минимума затрат / В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, К.В. Иванов. – Заявка №2017615096. Дата поступления 31 апреля 2017 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 24 июля 2017.

23. Physical model of Power Electronic Devices Based on Static Voltage Transducers / V.L. Burkovskii, A.D. Danilov, A.M. Litvinenko, V.N. Krysanov, A.L. Rutskov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89(6). – P. 381–384.

#### Крысанов Валерий Николаевич

Канд. техн. наук, ст. н.с., директор  
ООО ПКФ «Современные технологии»  
Хользунова ул., 10-б, д. 86, г. Воронеж, Россия, 394068  
Тел.: +7-920-228-56-06  
Эл. почта: sovteh2000@mail.ru

#### Бурковский Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. электропривода,  
автоматики и управления в технических системах  
(ЭАУТС) Воронежского государственного технического  
университета (ВГТУ)  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7 (473-2) 55-77-25  
Эл. почта: bvl@vorstu.ru

#### Хайченко Илья Александрович

Аспирант каф. ЭАУТС ВГТУ  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел. +7-952-433-26-05  
Эл. почта: li740@yandex.ru

Krysanov V.N., Burkovskii V.L., Khaychenko I.A.  
**Hardware solutions for energy-efficient control technologies of distribution network objects based on power semiconductor devices**

The article considers topical issues in development of energy-saving technologies to optimize the control of distribution networks according to the criterion of minimum power losses. The technology consists in introducing new hardware to control the modes based on static devices. Based on the analysis of the existing hardware created to control the modes of distribution networks, the developed circuitry solutions of the power part and the control system of the multifunctional thyristor voltage transformer and hybrid thyristor capacitor are proposed. Their main technical characteristics and ways to reduce voltage asymmetry, limiting short-circuit currents and regulating reactive power are determined. The use of software and hardware solutions was recommended for a wide range of energy conservation tasks, both in the electric power sector and at the level of industrial facilities.

**Keywords:** power saving, distribution networks, control optimization, static power regulators of voltage and reactive power.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-91-96

### References

- Shakaryan Yu.G., Morzhin Yu.I., Dorofeev V.V., Fortov V.E. *Kontseptsiya intellektualnoi elektroenergeticheskoi sistemy s aktivno-adaptivnoi setyu* [Concept for intelligent energy system with active-adaptive network]. M., 2015. 238 p. (in Russ.).
- Hua H., Cao J. Towards intelligent energy control and optimization in energy internet: a review. *International Conference on Energy Internet (ICEI)*, 2019, pp. 573–578.
- Cheng L., Qi N., Zhang F., Kong H., Huang X. Energy internet: concept and practice exploration. *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, pp. 1–5.
- Hingorani, Narain G., Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York, IEEE Press, 2000. 432 p.
- Hussein N.A., Eisa A.A., Mahmoud H.M., Shehata S.A., Othman A. Interline power flow controller (IPFC) characterization in power systems. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7(3), pp. 1656–1665.
- Kumbhare P.P. Application of Distributed Static Series Compensator for Improvement of Power System Stability // *Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 718, pp. 27–34.
- Naumov V.A., Matison V.A. [From Automated Electricity to Internet Energy]. *Energiya edinnoi seti*, 2019, vol. 2(44), pp. 36–44 (in Russ.).
- Stepanov V.N. [Use of power devices with controlled semi-conductor converters at electric power facilities]. *Elektroenergetika: segodnya i zavtra*. 2013, vol. 2, pp. 65–68 (in Russ.).
- Postolatii V.M., Bykova E.V. [Efficiency of application of controlled self-compensating high-voltage power transmission lines and transformer-type fa-control devices]. *Elektrichestvo*, 2010, vol. 2, pp. 7–14 (in Russ.).
- 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, vol. 8, pp. 69003–69037.
- Krysanov V.N. [Thyristor switched capacitor in energy efficient industrial power systems]. *Energobezopasnost' i energosberezhe-nie*, 2017, vol. 3, pp. 15–20 (in Russ.).
- Milyutin A.Yu., Temnikov E.A., Gotfrid P.A. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti s pomoshch'yu Statkom* [Reactive power compensation with Statcom]. *Nauchnyy forum tehnicheskie i fiziko mktematicheskie nauki: Sbornik statej po materialam X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Scientific Forum of Technical and Physiological Sciences: Collection of Articles on Materials of the X International Scientific and Practical Conference]. Moscow, MTsNO, 2017, pp. 122–129 (in Russ.).
- Obyazuev A.P., Kochkin V.N. *Sticheskie tiristornye kom-pensatory reaktivnoi moshchnosti dlya elektricheskikh setei i linii elektroperedachi* [Static reactivity thyristor compensators for electrical networks and transmission lines]. Moscow, VNIIE, 2002. 15 p. (in Russ.).
- Okon T., Wilkosz K. WLS State Estimation in Polar and Rectangular Coordinate Systems for Power System with UPFC: Significance of Types of Measurements. *Acta Energetica*, 2013, vol. 1(14), pp. 114–119.
- Kestler Clarence J. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer. Patent US 362137, 1971.
- Pullawar P.V., Paraskar S.R., Jadhao S.S. Notice of removal: real time voltage sag mitigation: new topology. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2015, vol. 2 (6), pp. 164–168.
- Krysanov V.N., Sharapov Yu.V. *Regulyator peremennogo napryazheniya* [AC voltage controller] Patent RF, no. 2014145372, 2014 (in Russ.).
- Krysanov V. N., Burkovskiy V.L., Danilov A.D. Reduction of Active Power Loss at 110/220 kV Node Substations Using Fuzzy Controller. *Problemele energeticii regionale*, 2019, pp. 57–69.
- Krysanov V.N., Sharapov Yu.V., Ivanov K.V. *Regulyator peremennogo napryazheniya* [AC voltage controller]. Patent RF, no. 2713739, 2019 (in Russ.).
- Krysanov V.N. *Apparatno-programmnoe upravlenie rezhimami uzlov nagruzki regional'nykh setei elektrosnabzheniya s pomo-shch'yu staticheskikh ustroystv* [Hardware and software control of load node modes of regional power supply networks using static devices]. Voronezh, VGTU, 2017. 244 p. (in Russ.).
- Krysanov V.N. *Programmno-apparatnoe obespechenie sistem upravleniya EES na baze tekhnologii FACTS* [Software and hardware of EPS control systems based on FACTS technology]. Voronezh, VGTU, 2016. 232 p. (in Russ.).
- Krysanov V.N., Burkovskii V.L., Ivanov K.V. *Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM no. 2017618141. Opredelenie optimalnykh parametrov kondensatornoi ustanovki dlya kompensatsii reaktivnoi moshchnosti po kriteriyu minimuma zatrat* [Certificate of state registration of computer program no. 2017618141. Determination of the optimal parameters of the capacitor unit for compensation of the core power by the minimum cost criterion]. no. 2017618141, 2017 (in Russ.).
- Burkovskii V.L., Danilov A.D., Litvinenko A.M., Krysanov V.N., Rutskov A.L. Physical model of Power Electronic Devices Based on Static Voltage Transducers. *Russian Electrical Engineering*, 2018, no. 89(6), pp. 381–384.

### Valerii N. Krysanov

Candidate of Science in Engineering, Senior Researcher,  
 Director of PKF Modern Technologies LLC  
 10-b, Holzunova st., 86, Voronezh, Russia, 394068  
 Phone: +7-920-228-56-06  
 Email: sovteh2000@mail.ru

**Viktor L. Burkovskii**

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
Department of Electric Drive, Automation and Control in  
Technical Systems, Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7 (473-2) 55-77-25  
Email: bvl@vorstu.ru

**Ilya A. Khaychenko**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive,  
Automation and Control in Technical Systems,  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-952-433-26-05  
Email: li740@yandex.ru