

УДК 621.318.435, 621.31.002.237

**В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов**

## **РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЛЭП**

Воронежский государственный технический университет

Рассмотрены пути реализации дополнительных функциональных возможностей статического регулятора напряжения на основе вольтодобавочного трансформатора, предназначенного для высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). Это решение позволяет оптимизировать пропускную способность ЛЭП, потери электрической энергии, ее качество, затраты на эксплуатацию и модернизацию силового оборудования. Приведены основные технические и энергетические параметры тиристорно-трансформаторного регулятора напряжения (ТТРН) с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора. Для их определения использовалась графическая среда имитационного моделирования MATLAB Simulink, модернизированные программы LabVIEW, LTSpice и блоки «powergui», «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1-40». Дополнительная оптимизация режимов работы ЛЭП при компенсации ее зарядной мощности реализуется с помощью разработанного алгоритма системы управления ТТРН. Приведены результаты анализа регулирования потребляемой силовыми трансформаторами ТТРН реактивной мощности, с учетом кривой намагничивания и ограничений по выбору оборудования и режимов его работы.

**Ключевые слова:** FACTS, компенсация реактивной мощности, линия электропередач, тиристорный регулятор напряжения.

### **1. Введение**

Одними из приоритетных направлений развития мировой электроэнергетики можно по праву назвать создание высоко интегрированных интеллектуальных электрических сетей с использованием силовой электроники и устройств на их основе, например, многофункциональные статические устройства регулирования напряжения и реактивной мощности.

Такой подход наиболее приоритетен для распределительных сетей (35-220 кВ), так как именно в этом сегменте наблюдается наиболее высокий уровень потерь энергии. Данное обстоятельство обусловлено износом сетевого оборудования, недостаточными возможностями по оптимизации режимов работы, недостаточным учетом потребления электрической энергии.

В настоящее время возрастает актуальность вопросов перехода от существующих электроэнергетических систем (ЭЭС) к сетям на базе концепции Smart Grid и технологии FACTS. В результате появляется возможность многопараметрической оптимизации режимов работы ЭЭС (по таким параметрам, как пропускная способность ЛЭП, потери электрической энергии, качество электрической энергии, затраты на эксплуатацию и модернизацию и т.д.) [1-3].

Основная концепция данного направления видится в реализации ЛЭП современных конструкций, статических компенсаторов реактивной мощности и трансформаторов (автотрансформаторов) со статическими регуляторами напряжения (РПН) [4, 5].

### **II. Цели и задачи исследования**

Цель настоящего исследования – реализация оптимального управления режимами работы высоковольтных ЛЭП с помощью регулирования не только напряжения, но и реактивной мощности. В данном контексте решаются задачи максимального использования технических возможностей статических устройств регулирования указанных параметров ЭЭС, а именно: тиристорных регуляторов для вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) ЛЭП. Основным средством компенсации реактивной мощности (РМ) являются в настоящее время батареи силовых конденсаторов (БСК) и шунтирующие реакторы (ШР). Они используются для оптимизации режимов работы ЛЭП и ограничения токов короткого замыкания. К их недостаткам следует отнести: отсутствие плавного регулирования РМ, низкое быстродействие, вероятность возникновения резонансных и автоколебательных процессов при определенных сочетаниях параметров элементов ЛЭП.

Более высокие технические характеристики имеет статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ). Он способен решать такие задачи как повышение пропускной способности ЛЭП и обеспечение устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях. Вместе с тем, наряду с несомненными достоинствами, ему свойственна высокая стоимость и относительно низкая надежность, связанная со структурной сложностью.

Регулирование напряжения реализуется весьма ограниченно, с помощью регулирования под нагрузкой (РПН) трансформаторов (автотрансформаторов) с механическим приводом. В высоковольтных сетях применяются схемы с ВДТ, включенными со стороны нуля силового трансформатора (автотрансформатора). Они позволяют получить продольное или поперечное регулирование напряжения, что позволяет изменять перетоки реактивных и активных мощностей по ЛЭП. К недостаткам данных устройств следует отнести отсутствие плавного регулирования напряжения, низкое быстродействие и недостаточную надежность.

### III. Решение задачи

Решение поставленной задачи видится в применении вместо механических устройств РПН тиристорных регуляторов напряжения, обладающих хорошим соотношением показателей «цена-качество» и широкими функциональными возможностями. Регулятор такого типа (рис. 1) содержит следующие элементы: основной трансформатор 1 и вольтодобавочный трансформатор 2, тиристорные ключи 3 и 4, блок задержки 5, и СУ. Он может быть реализован как полноценное устройство технологической платформы *FACTS* с минимальными затратами на регулировочное электрооборудование (как, например, уже на находящихся в эксплуатации агрегатах типа ВРТ, ДНУ, ЛТДН и на трансформаторах с анцапфами) класса напряжения от 35 кВ до 1150 кВ включительно [6-9].

### IV. Теоретическая часть

Описанные тиристорно-трансформаторные регуляторы напряжения (ТТРН) работают на принципе фазового управления, что приводит к искажению формы кривой выходного напряжения и тока, что является главным недостатком таких регуляторов. Учитывая это, для обеспечения допустимых по ГОСТ Р32144-2013 пределов нелинейных искажений целесообразно выбрать принцип двух зонного регулирования (режимах добавления и вычитания определенной величины напряжения) [10].

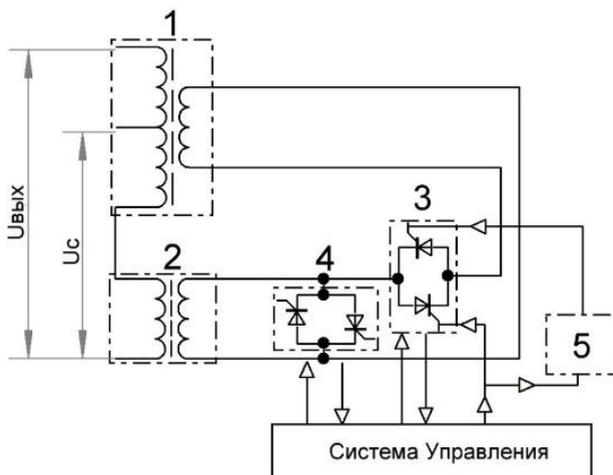


Рис. 1. Принципиальная однофазная электрическая схема силовой части ТТРН

Для получения количественных показателей технических и энергетических параметров ТТРН и их возможностей требуется определение

спектра высших гармоник с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора. При насыщении магнитопровода появляются дополнительные потери: возрастает первичный ток трансформатора и несинусоидальность. Эти задачи решались с помощью компьютерного моделирования ТТРН. Была использована графическая среда имитационного моделирования MATLAB Simulink, модернизированные программы LabVIEW, LTSpice. Модель, построенная в данной среде, представлена на рис. 2.

Используемые блоки «powergui», «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1-40» позволяют создать файл с данными петли гистерезиса и вычислить высшие гармоники.

Расчеты проводились при десятипроцентном диапазоне регулирования, вариации угла нагрузки  $\varphi = 0 \div 60^\circ$  и изменении выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  (за счет изменения угла отпирания тиристоров  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$ ).

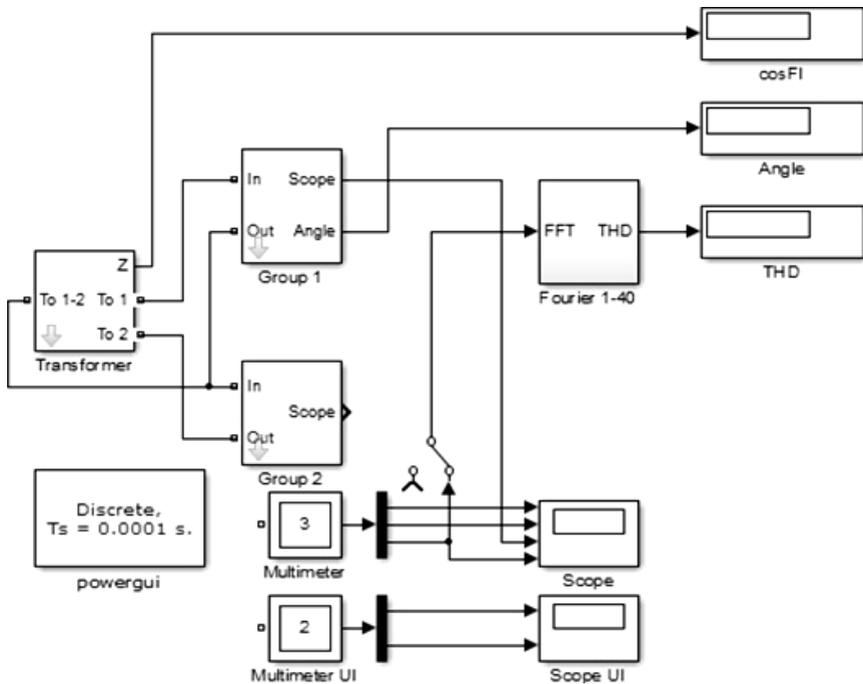


Рис. 2. Математическая модель одной фазы ТТРН

Было получено семейство трехмерных графиков зависимости КНИ фазного (рис. 3) и линейного (рис. 4) выходного напряжения от угла нагрузки и угла отпирания тиристоров.

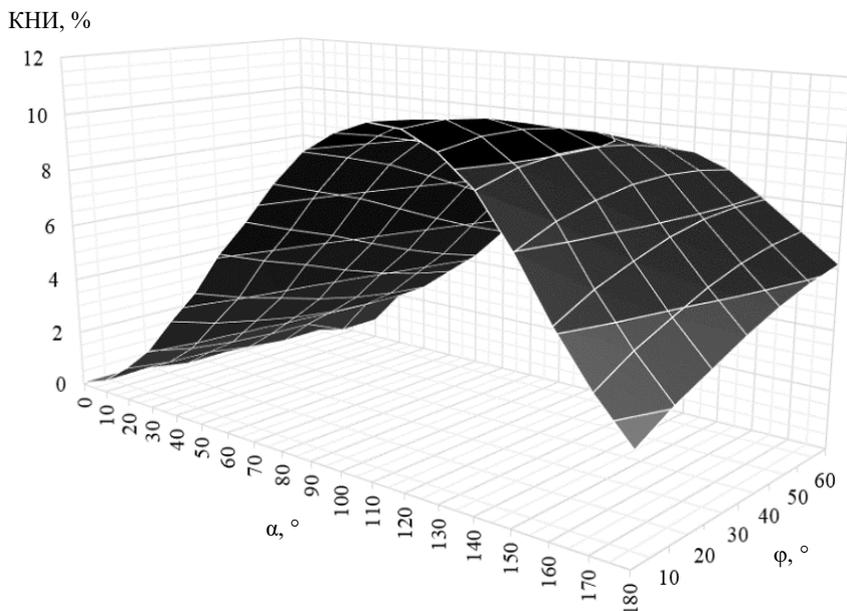


Рис. 3. Трехмерный график зависимости КНИ фазного выходного напряжения ТТРН от  $\alpha$ ,  $\varphi$ , с учетом кривой намагничивания силового трансформатора

Анализовалась и величина дополнительных потерь от высших гармоник в ВДТ и АТ. Используя известные соотношения и созданные в среде MATLAB Simulink специальные блоки вычисления, были определены зависимости мощности искажения  $T$ , дополнительных потерь высших гармоник в стали и меди ВДТ, АТ от угла отпирания тиристоров группы 3 (рис. 1) [11-13].

Расчеты показывают, что при десятипроцентном диапазоне регулирования дополнительные потери от высших гармоник не превышают 5 % от величины мощности искажения  $T$ , она же может достигать 27 % от номинальной мощности ВДТ ( $S = 100$  МВА). Данный фактор необходимо учитывать при выборе силового трансформаторного оборудования по критерию допустимого нагрева и установленной мощности.

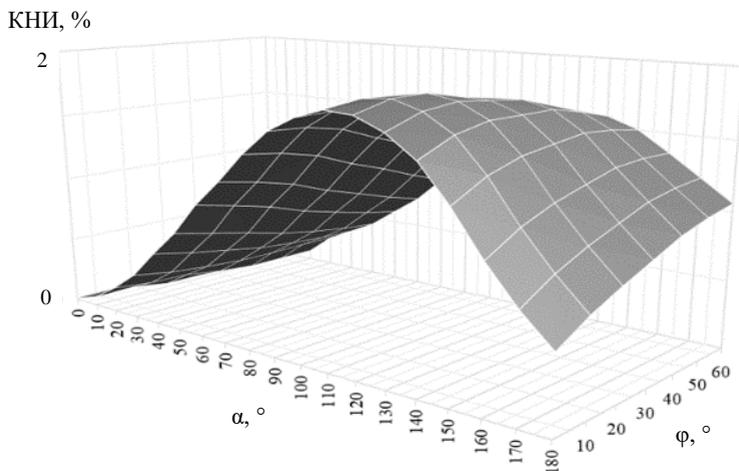


Рис. 4. Трехмерный график зависимости КНИ линейного выходного напряжения ТТРН от  $\alpha$ ,  $\varphi$ , с учетом кривой намагничивания силового трансформатора

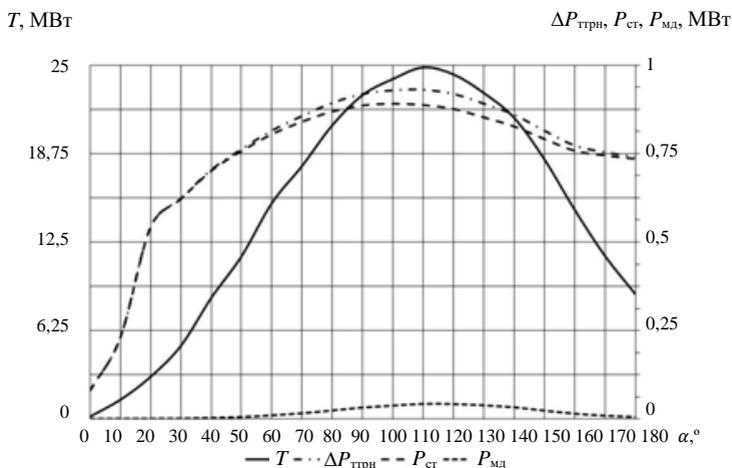


Рис. 5. Зависимость дополнительных потерь от высших гармоник в ВДТ (при  $\varphi = 30^\circ$ )

Регулирование потребления реактивной мощности основным и вольтодобавочным трансформаторами на схемотехническом уровне достигается введением в цепь управления одним из тиристоров тиристорного

ключа 4, регулируемого элемента задержки. Он позволяет получить постоянную составляющую в гармоническом составе напряжения на трансформаторе 2, что и изменяет потребляемую реактивную мощность.

Для предлагаемого выше аппаратного решения был проведен анализ изменения потребляемой реактивной мощности с учетом кривой намагничивания силового автотрансформатора (АТ) (заводские данные, для АОДЦТ-667000/1150/500/20). В качестве математической основы программы расчета был использован метод Фурье, для определения амплитуды и фазовых углов гармоник, коэффициента нелинейных искажений и действующего значения тока намагничивания  $I_{\mu}(t)$ . При этом считалось, что основной магнитный поток АТ не искажается его магнитной системой  $\Phi(t) \equiv U_{\text{вых}}(t) = \Phi \cdot \sin(\omega t)$ , а активной составляющей можно пренебречь (она много меньше его реактивной составляющей  $I_{\mu a} \ll I_{aR}$ ).

Для нахождения потребляемой АТ (аналогично и ВДТ) активной, реактивной мощности и постоянной составляющей использовался программный способ на базе библиотеки SimPowerSystems в MATLAB Simulink. В процессе расчетов варьировалась нагрузка АТ ( $0,5 \cdot P_{н}$ ;  $0,75 \cdot P_{н}$ ;  $P_{н}$ ), степень его подмагничивания. При разности углов включения  $\Delta\alpha_p = \alpha_2 - \alpha_1 = 40^\circ - 30^\circ = 10^\circ$ , имеем постоянную составляющую, равную 0,52 % от номинального тока ВДТ. При  $\Delta\alpha_p = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$  – постоянная составляющая увеличивается до 5,88 %. Расчеты проводились при увеличении постоянной составляющей вплоть до значений 30 % от номинального тока ВДТ. Результаты расчетов представлены на рис. 6.

### VI. Практическая значимость

Основные практические результаты состоят в части реализации проектными организациями комплекса аппаратных решений по использованию ТТРН при перспективном и конкретном проектировании широкого класса объектов ЭЭС, вплоть до отдельных индивидуальных электротехнических комплексов.

Реализация предложенных выше аппаратных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне ЭЭС и сетевых энергоснабжающих компаний.

### VII. Заключение

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- для высоковольтных ЛЭП возможно использование тиристорных регуляторов напряжения ВДТ в качестве устройств РПН технологической платформы FACTS;

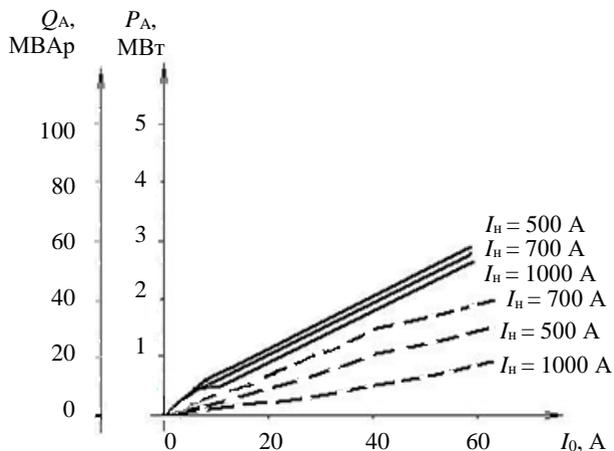


Рис. 6. Зависимость потребляемой АТ активной (сплошная линия) и реактивной (пунктирная линия) мощности от степени его подмагничивания

- для точного анализа возможностей применения этих необходим учет генерируемых ими высших гармоник и дополнительных потерь;
- в основных режимах работы ЛЭП, КНИ не превышает  $8,5 \div 10 \%$ , а для линейного напряжения данный параметр не превышает  $2 \%$ ;
- для обеспечения допустимых по ГОСТ Р32144-2013 пределов нелинейных искажений, целесообразно выбрать принцип двух зонного (не более  $10 \%$ ) регулирования;
- при  $10 \%$  диапазоне регулирования дополнительные потери от высших гармоник не превышают  $5 \%$  от величины мощности искажения  $T$ , она же может достигать  $27 \%$  от номинальной мощности ВДТ;
- благодаря специальному алгоритму работы силовых ключей тиристорного регулятора, возможна дополнительная оптимизация режимов работы ЛЭП по фактору компенсации РМ емкостного характера;
- при реализации такого алгоритма, силовой автотрансформатор способен увеличить потребление реактивной мощности с  $0,3 \div 0,5 \%$  до  $20 \div 30 \%$  от СН. При этом потери активной мощности в АТ дополнительно увеличивается до  $1,5 \%$  от СН.

© Крысанов В.Н., 2019

© Бурковский В.Л., 2019

© Данилов А.Д., 2019

**Библиографический список**

- [1] Гусев С.И., Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Развитие устройств FACTS // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2013. № 1. С. 7-20.
- [2] Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф. Опыт внедрение технологии FACTS за рубежом (часть 1) // Энергохозяйство за рубежом. 2007. № 2. С. 27-48.
- [3] Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф. Опыт внедрение технологии FACTS за рубежом (часть 2) // Энергохозяйство за рубежом. 2007. № 3. С. 46-64.
- [4] Степанов В.Н. Использование силовых устройств с управляемыми полупроводниковыми преобразователями на объектах электроэнергетики // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2013. № 2. С. 34-40.
- [5] Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- [6] Крысанов В.Н. О возможности применения тиристорного регулятора напряжения в электрических сетях класса 6-1150 кВ // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 10. С. 9-12.
- [7] Расулов М.М., Рубин Я.С., Крысанов В.Н., Быков В.Е., Мамедов А.Ф. Регулятор переменного напряжения, А.С. 1267384 СССР, заявл. 27.06.85; опубл. 30.10.86. – Бюл. № 40.
- [8] Лысков Ю.И., Крысанов В.Н., Быков В.Е., Байрашная О.Б. Регулируемый преобразователь переменного напряжения в переменное, А.С. 1494172 СССР, заявл. 30.11.87; опубл. 15.07.89. – Бюл. № 26.
- [9] Arrillage J., Woods G., Duke R.M. Thyristor-controlled in-phase boosting for h.v.d.c. converters // IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution). 1980. № 127 (4). Pp. 221-227.
- [10] Крысанов В.Н., Гамбург К.С. Выбор силовой части высоковольтных тиристорных регуляторов напряжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 3. С. 35-39.
- [11] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Исследование влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронного двигателя // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 2. С. 6-11.
- [12] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Учет нелинейности магнитопровода силового трансформатора в статических регуляторах напряжения для энергопотребителей // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 35-38.
- [13] Рекус Г.Г., Чирков М.Г. О воздействии гармоник на нагрев асинхронных двигателей // Известия вузов СССР. Энергетика. 1965. № 3. С. 34-38.

V.N. Krysanov, V.L. Burkovsky, A.D. Danilov

## EXPANSION OF FUNCTIONAL CAPABILITIES OF STATIC POWER LINE VOLTAGE CONTROL DEVICES

Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russia

**Abstract.** The article discusses the ways of implementing additional functionality of a static voltage regulator for high-voltage power lines, based on a booster transformer. This solution allows one to optimize the transmission capacity of power lines, the losses of electric energy, power quality, operating costs and cost of upgrading power equipment. Thyristor-transformer voltage regulator (TTVR) main technical specifications and energy parameters, considering the power transformer magnetic core effect were considered. MATLAB Simulink graphical simulation environment, upgraded LabVIEW, LTSpice programs and «powergui» blocks, «Hysteresis Design Tool», «Fourier 1–40» blocks were applied to determine them. Additional optimization of power lines operation modes is implemented using the developed algorithm of the TTVR control system when compensating the charging power of power lines. The analysis of regulation of reactive power consumed by TTVR power transformers was carried out, taking into account the magnetization curve, and restrictions on the choice of equipment and modes of operation.

**Keywords:** FACTS, power transmission lines, reactive power compensation, thyristor voltage regulator.

### References

- [1] S.I. Gusev, Yu.G. Shakaryan and N.L. Novikov, «Razvitie ustrojstv FACTS (Development of FACTS devices)», *Elektroenergetika: segodnya i zavtra (Electrical energy industry today and tomorrow)*, vol. 1, pp. 7-20, 2013 (in Russian).
- [2] M.S. Misrikhanov and V.F. Sitnikov, «Opyt vnedrenie tekhnologii FACTS za rubezhom (chast' 1) (Experience of FACTS technology implementation abroad (part 1)) », *Energohozyajstvo za rubezhom (Power utilities abroad)*, vol. 2, pp. 27-48, 2007 (in Russian).
- [3] M.S. Misrikhanov and V.F. Sitnikov, «Opyt vnedrenie tekhnologii FACTS za rubezhom (chast' 1) (Experience of FACTS technology implementation abroad (part 1))», *Energohozyajstvo za rubezhom (Power utilities abroad)*, vol. 3, pp. 46-64, 2007 (in Russian).
- [4] V.N. Stepanov, «Ispol'zovanie silovyh ustrojstv s upravlyaemymi poluprovodnikovymi pre-obrazovatelyami na ob'ektah elektroenergetiki (Application of power facilities with controlled semi-conductor converters at power engineering facilities)», *Elektroenergetika: segodnya i zavtra (Electrical energy industry today and tomorrow)*, vol. 2, pp. 34-40, 2013 (in Russian).

- 
- [5] N.G. Hingorani and L. Gyugui, *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- [6] V.N. Krysanov, «O vozmozhnosti primeneniya tiristorного регулятора napryazheniya v elektricheskih setyah klassa 6-1150 kV (About possible application of thyristor voltage controller in electric grids of 6-1150 kV)», *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 10, pp. 9-12, 2008 (in Russian).
- [7] M.M. Rasulov, Ya.S. Rubin, V.N. Krysanov, V.E. Bykov and O.B. Bayrashnaya, «Regulyator peremennogo napryazheniya (AC controller)», USSR Patent 1267384, Oct. 30, 1986 (in Russian).
- [8] Y.I. Lyskov, V.N. Krysanov, V.E. Bykov and O.B. Bayrashnaya, «(Reguliruemyy preobrazovatel' peremennogo napryazheniya v peremennoe) Adjustable converter from AC to AC», USSR Patent 1494172, July 15, 1989 (in Russian).
- [9] J. Arrillage, G. Woods and R.M. Duke, «Thyristor-controlled in-phase boosting for h.v.d.c. converters», *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 127, no. 4, pp. 221-227, July 1980.
- [10] V.N. Krysanov and K.S. Hamburg, «Optimization of high-power thyristor voltage regulators», *Energy Safety and Energy Economy*, vol. 3, pp. 35-39, 2011.
- [11] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, «Issledovanie vliyaniya nesinusoidal'nosti pitayushchego napryazheniya na energeticheskie harakteristiki asinhronnogo dvigatelya (Investigation of effect of supply voltage unsinusoidality on power characteristics of asynchronous motor)», *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 2, pp. 6-12, 2014 (in Russian).
- [12] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, «Uchet nelinejnosti magnitoprovoda silovogo transformatora v staticheskikh regulyatorah napryazheniya dlya energopotrebitel'ej (Consideration of transformer core non-linearity in static voltage controllers for power consumers)», *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya (Electro technical facilities and control systems)*, vol. 3, pp. 35-39, 2015 (in Russian).
- [13] G.G. Rekus and M.G. Chirkov, «O vozdejstvii garmonik na nagrev asinhronnyh dvigatelej (About effect of harmonics on warming-up of asynchronous motors)», *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij SSSR. Energetika (Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations)*, vol. 3, pp. 34-38, 1965 (in Russian).