

УДК 621.316.722

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Хохлов Ю.И., Дудкин М.М., Сафонов В.И., Лонзингер П.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, e-mail: admin@susu.ac.ru

Выполнено экспериментальное исследование трансформатора с векторным управлением с использованием лабораторного стенда на примере однофазной схемы. Показана возможность плавного регулирования выходного напряжения трансформатора при векторном управлении. Управление осуществлялось посредством введения синхронизированного с питающей сетью напряжения управления. Напряжение управления было получено устройством, основными элементами которого являются два активных преобразователя с широтно-импульсной модуляцией, соединенные общим звеном постоянного тока. Получены экспериментальные внешние характеристики трансформатора, которые качественно совпадают с теоретическими зависимостями. Показана линейность регулировочных характеристик исследуемого трансформатора. Получены временные зависимости тока и напряжений на элементах установки, также качественно совпадающие с теоретическими.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, силовой трансформатор, векторное управление, регулирование напряжения нагрузки, широтно-импульсная модуляция

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF POWER TRANSFORMER WITH VECTORIAL CONTROL

Khokhlov Y.I., Dudkin M.M., Safonov V.I., Lonzinger P.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, e-mail: admin@susu.ac.ru

An experimental investigation of a power transformer with a vectorial control was implemented. The research has done in one-phase case by using of laboratory equipment. A possibility of a smooth power transformer's output voltage adjustment with using the vectorial control was show. An adjustment was realized by mean of introducing of a synchronized with mains supply control voltage. The control voltage was created by means of a control device. Main part of the device are two pulse-width modulation converters connected by common DC bus. Output performances of the power transformer those correspond to the transformers' theory were obtained. A linear relationship of a device's regulating performance was displayed. Time dependences of transformer's voltages and current were plotted. The dependences are also correspond to the theory.

Keywords: experimental investigation, power transformer, vectorial control, electrical load voltage regulation, pulse-width modulation

Использование регулирования под нагрузкой (РПН) и переключения без возбуждения (ПБВ) для регулирования напряжения силовых трансформаторов обладает рядом недостатков, таких как дискретность регулирования, невозможность компенсации реактивной мощности, износ трансформаторного масла и механических контактов и т.п. Развитие силовой электроники позволило создавать более совершенные устройства регулирования [3]. В [6] описан трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения. В [4] рассматривается устройство для плавного регулирования вторичного напряжения силового трансформатора, содержащее ведомый сетью обратимый преобразователь, а также два автономных инвертора, работающих в 180-градусном режиме.

В работе [7] предложен, а затем теоретически исследован трансформатор с векторным управлением [5], в котором напряжение управления создается устройством

состоящим из двух активных преобразователей, соединенных звеном постоянного тока. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию такого трансформатора.

Материалы и методы исследования

Ввиду отсутствия в лаборатории трехфазного оборудования эксперимент проводился в однофазном исполнении. Лабораторная установка (рис. 1) состоит из исследуемого трансформатора (1) с активным сопротивлением нагрузки (2) и устройства векторного управления (3)–(12). Питание установки осуществляется от одной из фаз напряжения сети.

Трансформатор (9) включен последовательно с источником напряжения сети. Для регулирования напряжения на выходе трансформатора (9) используется импульсный преобразователь электроэнергии [1], состоящий из активного выпрямителя (4) и автономного инвертора напряжения (6). Между собой преобразователи (4) и (6) соединены на стороне постоянного тока при помощи емкостного накопителя (5) (рис. 1). Силовые блоки преобразователей напряжения (4) и (6) представляют собой

однофазные мосты, выполненные на *IGBT* транзисторах со встречно-включенными диодами и работающих в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Подключение активного выпрямителя напряжения (4) к сети осуществляется при помощи электромагнитного фильтра (3), обеспечивающего подавление высокочастотных гармоник, соответствующих частотному спектру широтно-импульсной модуляции преобразователя.

Активный выпрямитель (4) в системе выполняет две основные функции:

1) работает на сеть переменного тока, обеспечивая двунаправленный поток мощности с высокими энергетическими показателями ($\cos \varphi \approx 1,0$ и коэффициент мощности $\chi \approx 1,0$), что достигается за счет формирования синусоидального тока, совпадающего по фазе или противофазного напряжению сети;

2) стабилизирует постоянное напряжение на выходе.

Система управления АВН (4) построена по принципу подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и внешним контуром напряжения [1, 2].

Автономный инвертор напряжения (6) преобразует постоянное напряжение в регулируемое пере-

менное с частотой напряжения сети. Синхронизация системы управления (12) с частотой напряжения сети осуществляется при помощи датчика напряжения (10). Регулирование амплитуды сигнала задания осуществляется потенциометром (11). Выделение основной гармоники напряжения с выхода импульсного преобразователя (6) производится пассивным LC-фильтром (7). Переключение силовых транзисторов преобразователя (6) осуществляется в режиме ШИМ по несимметричному закону управления (однополярная модуляция) [2], что позволяет уменьшить пульсации тока на выходе в два раза по сравнению с симметричным законом, что положительно сказывается на массогабаритных размерах LC-фильтра (7). Резистор (8) предназначен для предотвращения опасных перенапряжений, которые могут возникнуть в процессе включения установки (рис. 1).

В лабораторной установке в качестве импульсного преобразователя электроэнергии используется модуль «Транзисторный преобразователь», мнемосхема которого приведена на рис. 2. Основные типы и параметры силового оборудования экспериментальной установки (рис. 1) приведены в таблице.

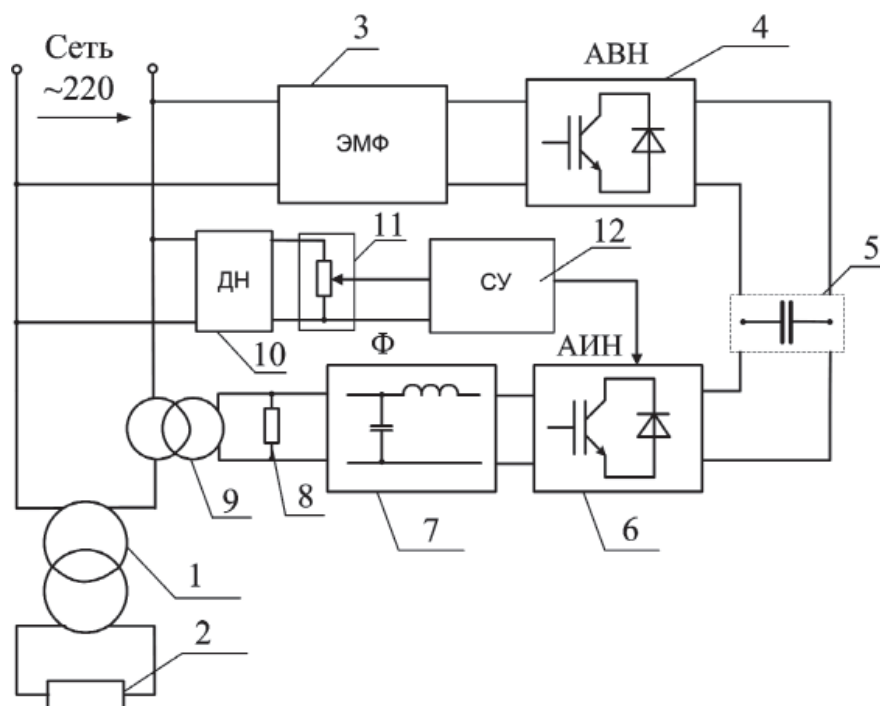


Рис. 1. Схема экспериментальной установки трансформатора с векторным управлением

Тип оборудования	Параметры
Исследуемый трансформатор (1)	Лабораторный трансформатор. 220/250 В. Соппротивления первичной обмотки: $R_1 = 17 \text{ Ом}$; $X_1 = 12 \text{ Ом}$
Активная нагрузка (2)	Дискретное изменение в диапазоне 400–1600 Ом
Импульсный преобразователь энергии (3)–(6)	Напряжение питания $\sim 220 \text{ В}$, мощность 300 ВА, напряжение на выходе до $\sim 250 \text{ В}$
LC-фильтра (7)	$L = 10 \text{ мГн}$, $C = 2 \text{ мкФ}$
Резистор (8)	$R = 1600 \text{ Ом}$
Понижающий трансформатор (9)	ОСМ1-0,063 ВА – 220 В – 42 В

Измерение напряжений (токов), а также осциллографирование временных зависимостей осуществлялось при помощи информационно-измерительной системы стенда, включающей измерительные приборы (мультиметры, амперметры), датчики напряжения (тока), плату сопряжения датчиков с компьютером и программное обеспечение *Delta Profi*.

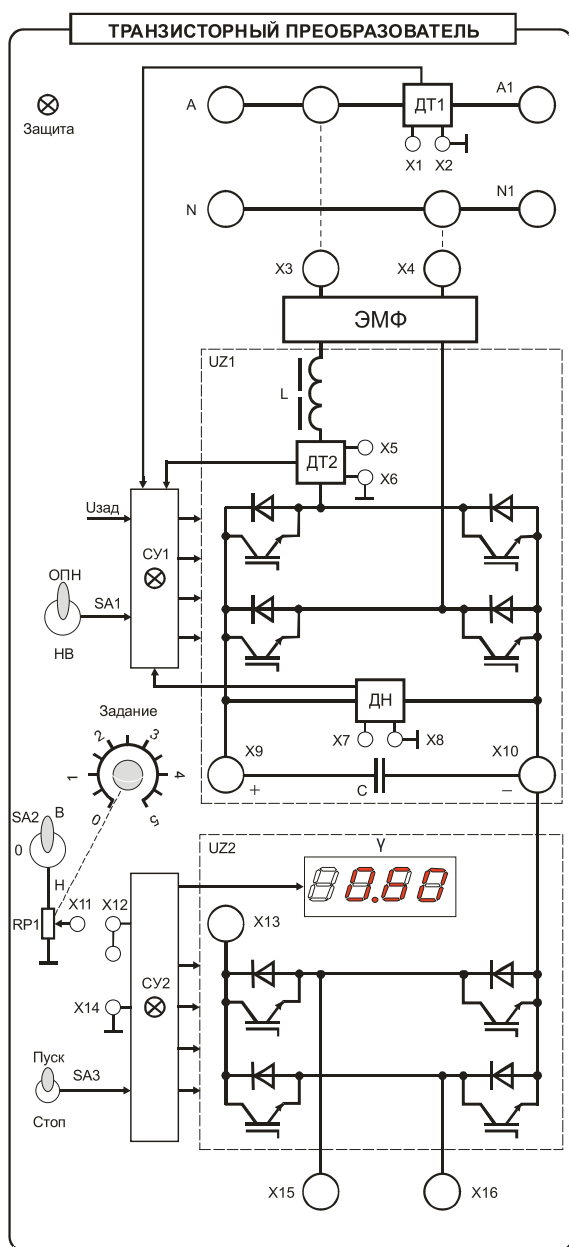


Рис. 2. Мнемосхема транзисторного преобразователя

Таким образом, посредством применения лабораторной установки (рис. 1) мы получили возможность формировать регулируемое, синхронизированное с сетью напряжение управления, вносимое в цепь питания трансформатора (1) последовательно с напряжением сети.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 приведены экспериментальные внешние характеристики исследуемого трансформатора $U = f(I)$ при различных значениях коэффициентов модуляции АИН μ для двух режимов работы:

1) $\rho = 0^\circ$ – напряжение управления (выход трансформатора (9)) находится в фазе с напряжением сети;

2) $\rho = 180^\circ$ – напряжения управления и сети находятся в противофазе. Здесь U, I – действующие значения напряжения и тока на выходе исследуемого трансформатора (1) соответственно. Для каждого коэффициента модуляции $\mu = 0,5$ (опыты 3 и 4), $\mu = 0,63$ (опыты 2 и 5), $\mu = 0,75$ (опыты 1 и 6) проводилась серия из 3 опытов. На рис. 3 (точки) приведены экспериментальные данные для одной серии опытов.

Для каждого опыта построена прямая регрессионная зависимость $U(I) = U_{xx} - ZI$, коэффициенты в которой получены методом наименьших квадратов. Здесь U_{xx} и Z – напряжение холостого хода и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора. Правильность выбора функции регрессии была подтверждена расчетом коэффициента корреляции, значение которого для всех опытов превышало 0,996. Относительные ошибки в определении коэффициентов для каждого опыта составляли не более 2,2% (для U_{xx}) и не более 14% (для Z). На рис. 3 прямыми показаны линии регрессии.

Мягкость внешних характеристик исследуемой системы объясняется высокими значениями сопротивлений обмоток трансформаторов (1) и (9).

Расчетные значения коэффициентов для всех опытов U_{xx} использовались для построения регрессионной зависимости $U_{xx}(\mu) = E - \Delta E\mu$. Правильность выбора функции регрессии также была подтверждена расчетом коэффициента корреляции, значение которого было равно 0,988. Относительные ошибки в определении коэффициентов составляли 0,7% (для E) и 7,6% (для ΔE).

На рис. 4 регулировочная характеристика трансформатора с векторным управлением на холостом ходу $U_{xx}(\mu)$ показана точками для расчетных значений U_{xx} для каждого из опытов и линией для рассчитанной регрессионной функции. На рис. 4 условно положительным значениям коэффициента модуляции μ соответствует режим работы $\rho = 0^\circ$, когда напряжения управления и сети совпадают по фазе, а условно отрицательным μ – режим $\rho = 180^\circ$ при противофазных напряжениях.

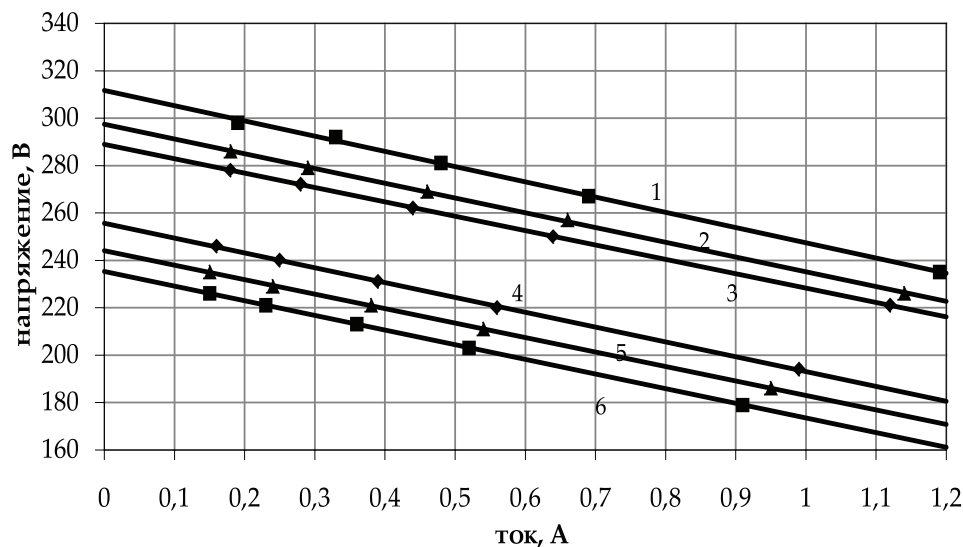


Рис. 3. Экспериментальные внешние характеристики исследуемого трансформатора ($1 - \mu = 0,75, \rho = 0^\circ$; $2 - \mu = 0,63, \rho = 0^\circ$; $3 - \mu = 0,5, \rho = 0^\circ$; $4 - \mu = 0,5, \rho = 180^\circ$; $5 - \mu = 0,63, \rho = 180^\circ$; $6 - \mu = 0,75, \rho = 180^\circ$)

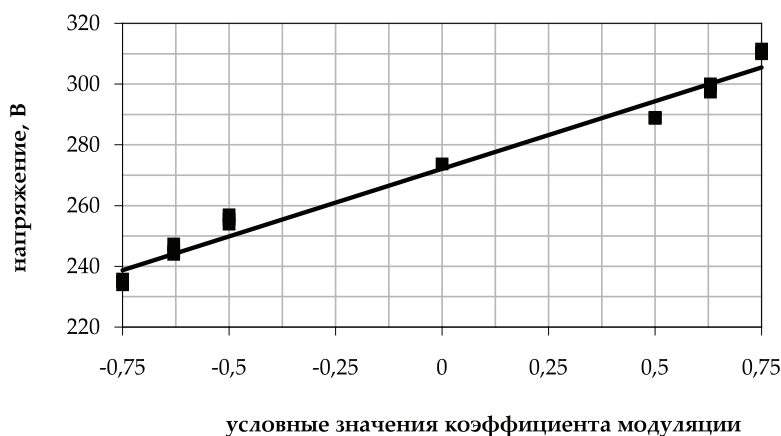


Рис. 4. Регулировочная характеристика трансформатора с векторным управлением

Значения напряжения холостого хода при отсутствии регулирования E и вольтодобавочной ЭДС ΔE были измерены вольтметром с относительной ошибкой 1,5%. В обоих случаях результаты измерений попали в доверительный интервал, полученный при статистической обработке опытных данных.

Теория трансформатора с векторным управлением [5] была развита с учетом допущений, характерных для мощных высоковольтных энергетических установок, при описании электромагнитных процессов в которых пренебрегают активными сопротивлениями. В экспериментальном исследовании на учебном лабораторном стенде это допущение не выполняется. Поэтому сравнение теоретических и экспериментальных ре-

зультатов возможно выполнить только качественно.

Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных позволяет учесть все случайные и систематические ошибки, допущенные при проведении эксперимента. Результаты статистической обработки свидетельствуют об отсутствии ошибочных данных в исходной выборке. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлено, что нагрузочная характеристика трансформатора является линейной функцией, что соответствует его теории при общепринятых допущениях. Также установлено, что зависимость $U_{xx}(\mu)$ является линейной функцией, что соответствует теории активных преобразователей с широтно-импульсной модуляцией.

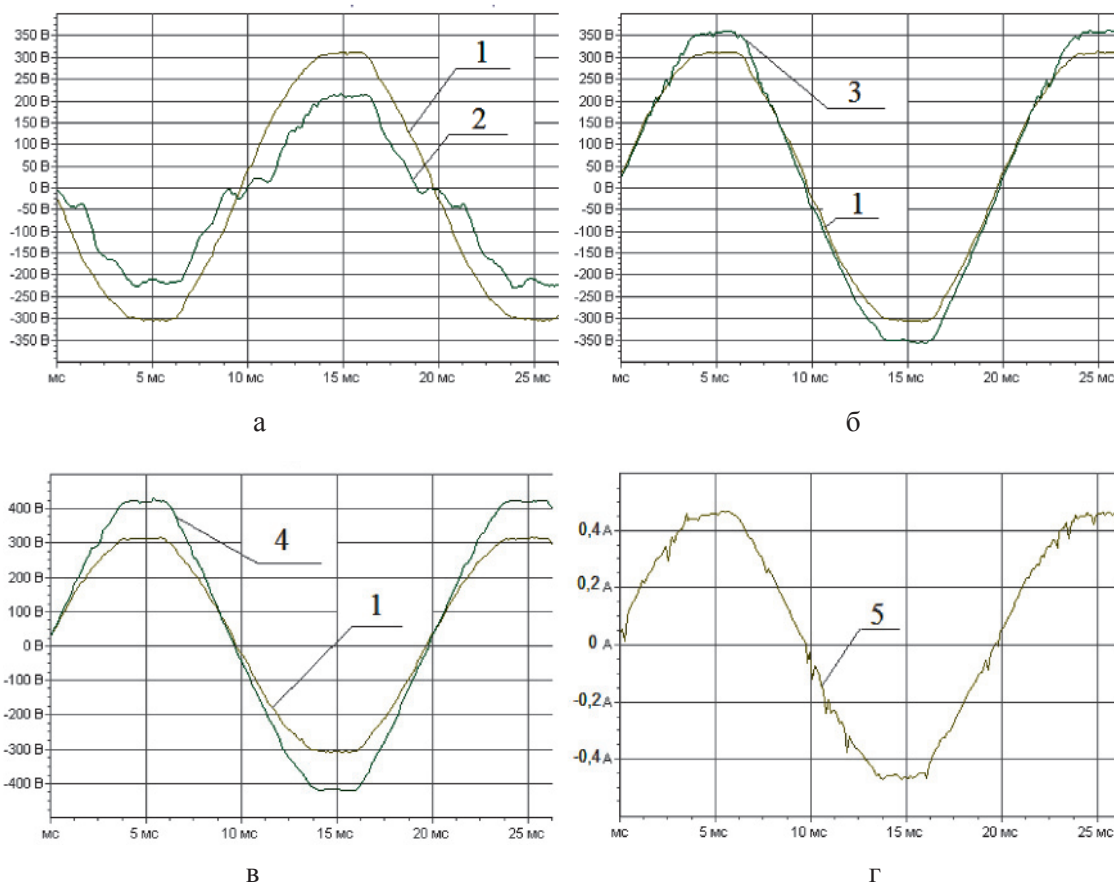


Рис. 5. Осциллограммы:
 1 – напряжения сети; 2 – напряжения управления;
 3 – напряжения на входе исследуемого трансформатора;
 4 – напряжения на выходе исследуемого трансформатора; 5 – тока сети

На рис. 5 приведены осциллограммы токов и напряжений на элементах исследуемой схемы. Данные были получены при $\rho = 0^\circ$ и $\mu = 0,75$. На осциллограммах видно, что напряжение управления (2) синфазно напряжению сети (1). Анализ полученных осциллограмм с учетом уменьшения амплитуды напряжения управления в соответствии с коэффициентом трансформации $K_T = 220/42$ трансформатора (9) показал адекватность результатов общим законам электротехники, записанных для первой гармоники. В напряжении управления (рис. 5, а) очевидно наличие канонических высших гармоник, что объясняется ограничениями минимального и максимального коэффициентов заполнения включения силовых ключей преобразователя (6), а также искажениями формы сигнала управления (напряжения сети) на входе системы управле-

ния (12). Ток питающей сети практически синусоидален и находится в фазе с напряжением питающей сети.

Выводы

1) экспериментально продемонстрирована возможность плавного изменения выходного напряжения трансформатора, осуществляемого устройством векторного управления;

2) полученные внешние характеристики трансформатора с векторным управлением качественно согласуются с теоретическими зависимостями;

3) показана линейность регулировочной характеристики исследуемого трансформатора;

4) временные зависимости электромагнитных процессов, протекающих в исследуемом устройстве, качественно согласуются с теоретическими зависимостями.

Список литературы

1. Дудкин М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 5–18.
2. Дудкин М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 2 (38). – С. 25–32.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
4. Климах В.С., Симоненко И.Г. Устройство для стабилизации напряжения трансформаторной подстанции // Патент RU 2159004.
5. Сафонов В.И., Константинов В.Д., Лонзингер П.В. Принцип действия трансформатора с векторным управлением // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – <http://www.science-education.ru/116-12939> (дата обращения: 26.01.2014).
6. Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Липужин И.А. Моделирование энергоэффективных режимов работы цифровой электрической подстанции // Федоровские чтения – 2013. XLIII Международная научно-практическая конференция. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 155–159.
7. Хохлов Ю.И., Лонзингер П.В., Сафонов В.И. Схемные решения силовых трансформаторов с векторным управлением // Федоровские чтения – 2013. XLIII Международная научно-практическая конференция – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 85–87.

References

1. Dudkin M.M., Jenergosberegajushhie tehnologii v ispytatel'nyh stendah s ispol'zovaniem odnofaznyh obratimyh preobrazovatelej // Vestnik JuUrGU. Serija «Jenergetika». 2013. T. 13. no. 1. pp. 5–18.

2. Dudkin M.M. Jenergeticheskie karakteristiki odnofaznyh obratimyh preobrazovatelej naprjazhenija s razlichnymi zakonami moduljacji // Prakticheskaja silovaja jelektronika. 2010. no. 2 (38). pp. 25–32.

3. Zinov'ev G.S. Osnovy silovoj jelektroniki. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. 672 p.

4. Klimash V.S., Simonenko I.G. Ustrojstvo dlja stabilizacii naprjazhenija transformatornoj podstancii // Patent RU 2159004.

5. Safonov V.I., Konstantinov V.D., Lonzinger P.V. Princip dejstvija transformatora s vektornym upravleniem // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 2. <http://www.science-education.ru/116-12939> (data obrashhenija: 26.01.2014).

6. Sosnina E.N., Bedretdinov R.Sh., Lipuzhin I.A. Modelirovanie jenergojeffektivnyh rezhimov raboty cifrovoj jelektricheskoy podstancii // Fedorovskie chtenija 2013. XLIII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija. M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2013. pp. 155–159.

7. Hohlov Ju.I., Lonzinger P.V., Safonov V.I. Shemnye reshenija silovyh transformatorov s vektornym upravleniem // Fedorovskie chtenija 2013. XLIII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2013. pp. 85–87.

Рецензенты:

Ганджа С.А., д.т.н., профессор, декан энергетического факультета, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск;

Воронин С.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и электромеханические системы», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск.

Работа поступила в редакцию 12.02.2015.