

УДК 621.314.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВЕНАДЦАТИФАЗНОГО КОМПЕНСИРОВАННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Сафонов В.И., Хохлов Ю.И., Дзюба М.А., Лонзингер П.В.

ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет

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

Проведено экспериментальное исследование двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник входных токов шестифазных вентильных блоков в случае векторного управления. Исследование выполнено с использованием оборудования лабораторного стенда, подключенного к сети внутреннего электроснабжения университета. Напряжение управления, вносимое последовательно с напряжением питающей сети, создавалось посредством применения индукционного регулятора. Продемонстрировано качественное соответствие электромагнитных процессов, протекающих в преобразователе, полученной ранее теории преобразователя с векторным управлением. Получены экспериментальные внешние и энергетические характеристики выпрямителя. Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных показывает качественное соответствие теории и эксперимента. Сделан вывод о том, что векторное управление эквивалентно подключению преобразователя к источнику с регулируемыми амплитудами и фазами питающих напряжений.

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование, компенсированный выпрямитель, векторное управление, электромагнитные процессы, внешние и энергетические характеристики

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TWELVE-PHASE COMPENSATED RECTIFIER WITH VECTORIAL CONTROL

Safonov V.I., Khokhlov Y.I., Dzyuba M.A., Lonzinger P.V.

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

An experimental investigation of twelve-phase compensated rectifier with vectorial control was realized. The investigation was delivered by means of using laboratory equipment connected to an university's mains supply. The rectifier has a compensating device that filters in the commutating capacitors odd-multiple harmonics of rectifier assemblies' input currents. A control voltage that summarized with a mains supply voltage is created by means of using an induction voltage regulator. A qualitative equivalence between experimental rectifier's electromagnetic processes and the theory of converter with vectorial control was shown. Experimental rectifier's output and power performances were obtained. A statistical treatment of experimental data shows a qualitative equivalence between the theory and the outcome of experiment. The vectorial control is an equivalent of supplying the rectifier by a power source with adjustable amplitudes and phases of its voltages.

**Keywords:** experimental investigation, compensated rectifier, vectorial control, electromagnetic processes, output and power performances

Управление величиной выпрямленного напряжения является обязательным условием проведения производственных процессов, использующих источники постоянного тока. В зависимости от отрасли изменяются необходимый диапазон и необходимая точность регулирования [6]. Дискретное регулирование осуществляется в основном механически при помощи РПН или ПБВ трансформаторов. Плавное регулирование можно осуществить, применяя тиристорные выпрямители [1] либо дроссельное управление диодными выпрямителями [3]. Оба эти способа приводят к ухудшению энергетических показателей выпрямителей вследствие практически линейной зависимости потребляемой преобразователем реактивной мощности от угла управления.

Достигнутый к настоящему времени уровень развития силовой электроники позволяет создавать преобразователи на

полностью управляемых вентилях, в которых посредством применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на зажимах переменного тока создаются переменные напряжения, первые гармоники которых свободно регулируются как по амплитуде, так и по фазе [2]. Внесение указанных напряжений, пропущенных через низкочастотный фильтр, последовательно с фазными напряжениями питающей сети позволяет осуществить векторное управление выходным напряжением рассматриваемой системы и потоками мощности [5].

Применение для компенсации реактивной мощности, потребляемой выпрямителем, компенсирующего устройства малой установленной мощности, фильтрующего в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратные гармоники входных токов преобразовательных блоков, позволяет получить максимальную жесткость внешней

характеристики выпрямителя при полной компенсации потребляемой им реактивной мощности. Однако в выпрямителе данной конструкции не устраняется вышеназванный недостаток фазового способа управления выпрямленным напряжением [8].

Впервые способ векторного управления выпрямленным напряжением диодного преобразователя был предложен в [9, 4]. В работах [10, 7] проведено теоретическое исследование электромагнитных процессов и характеристик компенсированных выпрямителей с векторным управлением.

В настоящей работе с использованием лабораторного стенда выполнено экспериментальное исследование электромагнитных процессов и характеристик двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с векторным управлением, в котором в коммутрующие конденсаторы фильтруются нечетно-кратные гармоники токов преобразовательных блоков.

### Материалы и методы исследования

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве источника энергии в установке используется трехфазная сеть внутреннего электроснабжения университета с напряжением 380 В. Специальные технические средства, позволяющие улучшить показатели качества электроэнергии, не используются. Ввиду отсутствия в лаборатории мощных трехфазных активных преобразователей с ШИМ в качестве устройства векторного управления использован индукционный регулятор (1). Для измерения разности фаз между напряжением питающей сети и первой гар-

моникой входного тока преобразователя использовался фазометр ЭЛФ с классом точности 1,5 (2).

Трехфазный трехстержневой многообмоточный силовой трансформатор (3) имеет первичную трехфазную обмотку, соединенную в звезду (с числом витков  $w_1$ ), и вторичные обмотки, соединенные по схемам «треугольник» ( $w_2/\sqrt{3}$  витков) и «звезда» ( $w_3/3$  витков). Группы соединения обмоток У/Д/У-11-0. Трансформатором (3) создается ЭДС контура коммутации  $E_k = 220/\sqrt{3} = 127$  В.

Для создания компенсирующего устройства (4) используются две трехфазные трансформаторные группы (5 и 6) с коэффициентами трансформации между первичными обмотками (к которым подключаются коммутрующие конденсаторы (7)) и вторичными обмотками, равными  $\sqrt{3}$  и 1 для групп 5 и 6 соответственно. Обмотки трансформаторных групп соединены по схемам «треугольник – звезда» (группа (5)) и «звезда – звезда» (группа (6)). Экспериментально установлено, что индуктивное сопротивление контура коммутации  $x_k = 5$  Ом.

Конденсаторная батарея (7) компенсирующего устройства выполнена с помощью дискретно регулируемых в каждой фазе конденсаторов. Характеристики и электромагнитные процессы при проведении эксперимента исследуются в основном режиме работы преобразователя. При данном сопротивлении контура коммутации и емкости конденсаторов в каждой фазе  $C = 17,69$  мкФ, соответствующей относительной частоте контура коммутации  $\nu = 6$ , появляющийся при малых токах режим с повторной проводимостью вентилей, не позволяет снять исследуемые нами характеристики. Поэтому при проведении эксперимента значения емкости были установлены равными 28; 32 и 58 мкФ, что соответствует относительным частотам контура коммутации  $\nu$ , равным 4,77; 4,42 и 3,3.

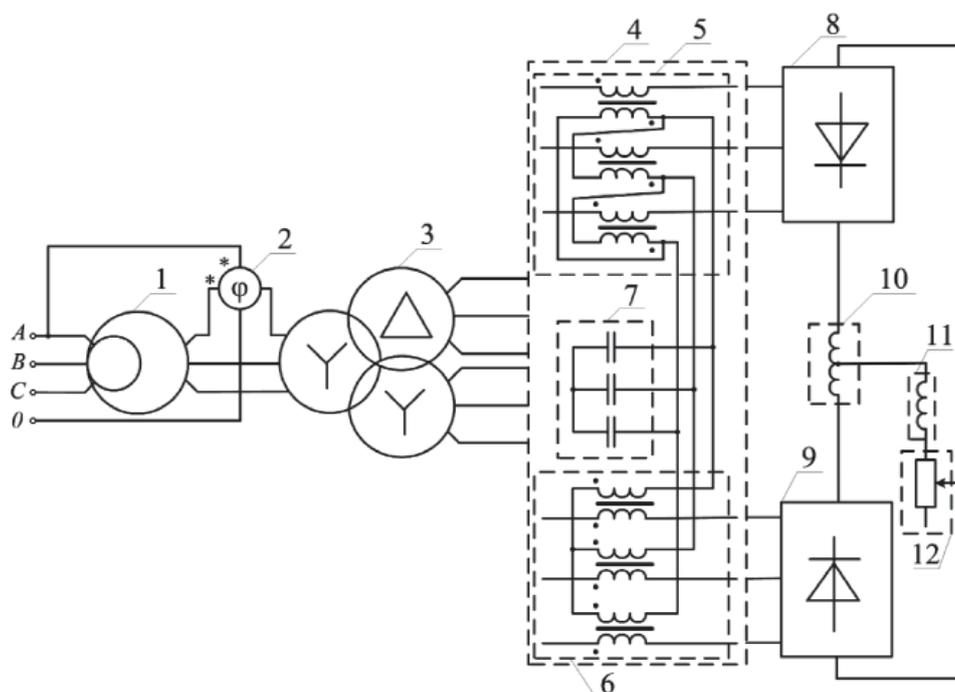


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Крайне важным условием подбора трансформаторного оборудования являлось равенство сопротивлений контуров коммутации для обоих вентиляльных блоков. Экспериментально данное условие было проверено измерением токов одной из фаз для двух вентиляльных блоков. Равенство величин токов и коммутационных интервалов (рис. 3, б) свидетельствовало, что необходимая симметрия достигнута.

Вентильные блоки (8) и (9) выполнены по мостовой схеме. Для обеспечения равномерного распределения выпрямленного тока между параллельно работающими мостами в схеме присутствует уравнивающий реактор (10). В целях уменьшения содержания высших гармонических составляющих в выпрямленном токе использован сглаживающий реактор (11). Нагрузка (12)  $R$  изменялась дискретно от 15,4 до 37,6 Ом.

Измерения выпрямленного напряжения выполнены мультиметром Agilent U1241B с относительной погрешностью 0,05%. Измерение выпрямленного тока осуществляется амперметром M366 с классом точности 1. Получение зависимостей токов и напряжений выполнено электронным осциллографом АКТАКОМ АСК-3117 при помощи прилагаемого к осциллографу программного пакета multichannel 2.0.4.3. Для потенциальной развязки и согласования параметров силовой и измерительной частей системы при измерении токов использовались трансформаторы тока УТТ-5 с классом точности 0,2 при сопротивлении нагрузки 0,2 Ом, а также подключенный к их вторичным цепям трехфазный лабораторный шунт с сопротивлением 0,3 Ом на каждую фазу. При измерении напряжений для тех же целей использовались лабораторный делитель напряжения для осциллографа с коэффициентом передачи по напряжению 0,01, а также дифференциальный пробник DP-50 с коэффициентом передачи 0,01 и погрешностью 2%.

### Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные данные для внешней характеристики выпрямителя показаны на рис. 2. Зависимости на рис. 2, а получены при изменении сопротивления нагрузки и емкости конденсаторной батареи 58 мкФ. Значения фазного напряжения сети и добавочного напряжения, создаваемого статормом (1), соответственно равны 220 и 240 В. Напряжения на входе выпрямителя равны

240 В (для зависимости 1); 140 В (для зависимости 2) и 100 В (для зависимости 3). Зависимости на рис. 2, б получены при изменении сопротивления нагрузки и емкостях конденсаторной батареи 28 мкФ (1), 32 мкФ (2) и 58 мкФ (3). Характеристики сняты при фазном напряжении на входе преобразовательного агрегата, равном 240 В. Измерения напряжений и токов проводились до режима повторной проводимости, наступление которого контролировалось по диаграмме напряжения диода (рис. 4, б). Угол сдвига фаз, измеряемый фазометром в диапазоне измерений фактически не изменялся. Для показанных на рис. 2, а зависимостей коэффициент реактивной мощности равен 1; 1,75 и 2,7 для кривых 1, 2 и 3 соответственно.

Во всех случаях экспериментальные данные были аппроксимированы линейными зависимостями  $U_d(I_d) = U_{d0} - X \cdot I_d$ . Правильность выбора функции регрессии была подтверждена расчетами коэффициентов корреляции и ошибок в определении коэффициентов. Коэффициенты корреляции были более  $0,995 < 1$ , ошибки коэффициента  $U_{d0}$  менее 2%, ошибки коэффициента  $X$  – менее 9%.

На рис. 2, а показано, что изменение величины входного напряжения выпрямителя позволяет выполнять плавное регулирование величины выпрямленного напряжения. Дополнительно при этом может осуществляться генерация реактивной мощности.

На рис. 2, б показано, что при изменении емкостей коммутирующих конденсаторов изменяется жесткость внешней характеристики выпрямителя. Согласно теории компенсированного выпрямителя [8] жесткость характеристики увеличивается в диапазоне изменения частоты контура коммутации  $\nu$  от 0 до 6. Таким образом, векторное управление преобразователем при фиксированном значении добавочного напряжения не изменяет качественно тенденций изменения жесткости внешней характеристики.

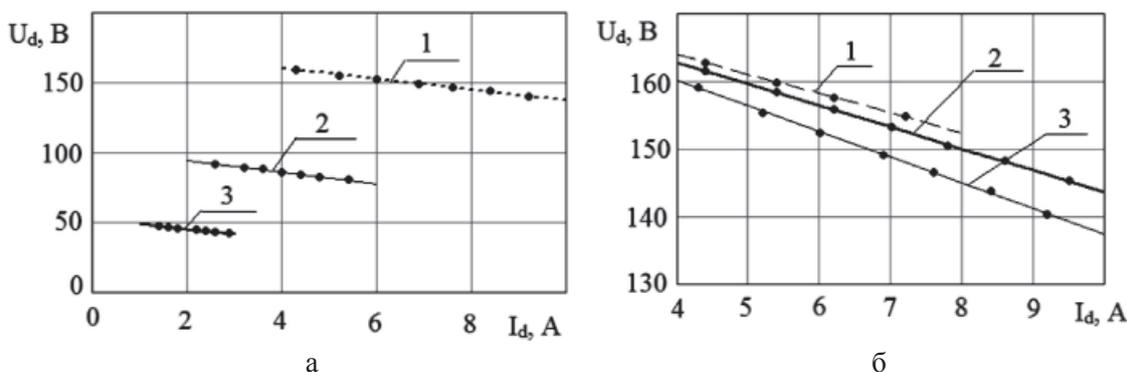


Рис. 2

Теория электромагнитных процессов компенсированного выпрямителя с векторным управлением и фильтрацией в коммутующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник входных токов преобразовательных блоков была получена при стандартных для мощных преобразователей допущениях, соответствующих второму уровню абстракций [8], когда пренебрегают активным сопротивлением обмоток трансформаторов. Для использованного в лабораторном стенде оборудования указанное условие не выполняется, поэтому сравнение теоретических и экспериментальных данных выполнено только качественно.

Осциллограммы токов и напряжений были сняты для следующих параметров экспериментальной установки:  $C = 32$  мкФ;  $R = 37,6$  Ом, суммарное фазное напряжение на входе преобразовательного трансформатора 240 В. Для определения начала отсчета времени на всех осциллограммах приведено напряжение сети с действующим значением 220 В. Во всех осциллограммах масштаб по времени 2 мс/д.

На рис. 3, а изображены для фазы А осциллограммы напряжения (1) и тока сети (3), напряжения (2) и тока (4) на входе преобразователя. Осциллограммы получены в масштабе 100 В/д (1 и 2) 1 А/д = 100 мВ/д (3); 2 А/д = 200 мВ/д (4). На рис. 3, б изображена для фазы А осциллограмма напряжения сети (1) и токов блоков 9 (2) и 8 (3)

(рис. 1). Осциллограммы получены в масштабе 100 В/д (1) 1 А/д = 100 мВ/д (2 и 3).

На рис. 3, а показано, что напряжение (2) и ток (4) на входе компенсированного преобразователя совпадают по фазе вследствие компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователем. Компенсация осуществляется коммутующими конденсаторами. Добавочное напряжение, вносимое статором индукционного регулятора, изменяет амплитуду и фазу напряжения на входе преобразователя (2) по сравнению с напряжением сети (1). Вследствие этого первая гармоника тока (4), потребляемого преобразователем, опережает по фазе напряжение сети (1). Поэтому из сети потребляется реактивная мощность (ток (3) отстает по фазе от напряжения сети (1)).

Для эффективной работы компенсированного преобразователя с фильтрацией в коммутующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник входных токов преобразовательных блоков необходимо соблюдение равенства амплитуд входных токов преобразовательных блоков и соответствующего смещения по времени их временных зависимостей на 12-ю часть периода. В противном случае компенсирующее устройство будет осуществлять фильтрацию в коммутующие конденсаторы также и четно-кратных гармоник токов. На осциллограммах рис. 3, б показано, что токи блоков (осциллограммы 2 и 3) фактически удовлетворяют вышеназванному условию.

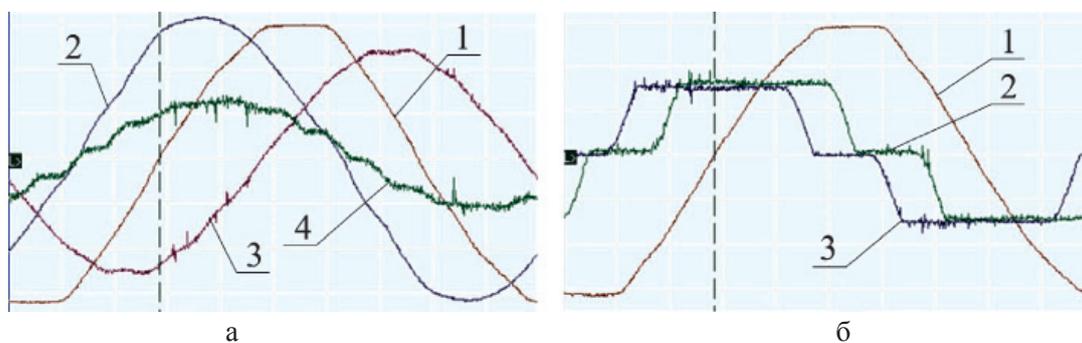


Рис. 3

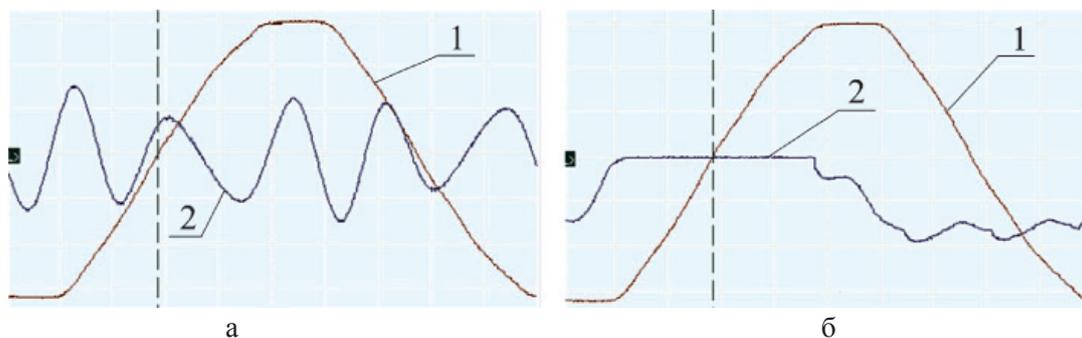


Рис. 4

На рис. 4, а изображены для фазы А осциллограмма напряжения сети (1) и напряжения коммутирующего конденсатора (2). Осциллограммы получены в масштабах 100 В/д (1) и 20 В/д (2). На рис. 4, б изображены осциллограмма напряжения сети (1) и напряжение (2) на вентиле фазы А коммутирующей группы блока 8 (рис. 1), прилегающей к катодному узлу блока. Осциллограммы получены в масштабах 100 В/д (1) и 100 В/д (2) для основного режима работы выпрямителя.

На рис. 4, а показано, что напряжение конденсатора содержит только нечетно-кратные гармоники, наибольшую амплитуду из которых имеют 5-я и 7-я гармоники. Амплитуда напряжения на конденсаторах значительно ниже амплитуды напряжения сети. Осциллограмма напряжения на вентиле (рис. 4, б) имеет вид, характерный для рассматриваемого компенсированного выпрямителя в режиме без повторной проводимости.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение векторного управления эквивалентно с точки зрения преобразовательного агрегата регулированию амплитуд и фаз ЭДС эквивалентного источника, питающего преобразователь, что проявляется в соответствующем изменении временных диаграмм и характеристик протекающих в нем электромагнитных процессов. Это согласуется с ранее полученными теоретическими результатами [7, 10].

### Выводы

1. Экспериментально продемонстрирована возможность векторного управления двенадцатифазным компенсированным выпрямителем с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник входных токов преобразовательных блоков.

2. Показано, что влияние векторного управления можно рассматривать как изменение параметров эквивалентного источника, питающего преобразователь, соответствующим образом изменяющее временные диаграммы и характеристики протекающих в нем электромагнитных процессов.

3. Получены экспериментальные внешние и энергетические характеристики выпрямителя, качественно согласующиеся с теоретическими.

### Список литературы

1. Бобков В.А., Бобков А.В. Реконструкция преобразовательных подстанций для питания электролизеров алюминия // Силовая электроника. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». – 2006. – № 4. – С. 66–68.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
3. Пат. 1781793 Российская Федерация. Управляемый выпрямитель / Ю.И. Хохлов; заявл. опубл. 1992, Бюл. – 46 с.
4. Пат. 2333589. Российская Федерация. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Ю.И. Хохлов; заявитель и патентообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. – 2007109991/09; заявл. 19.03.2007; опубл. – 10.09.2008, Бюл. № 25. – 13 с.

5. Рыжов Ю.П. Дальние передачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

6. Фишлер, Я.М. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.

7. Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лонзингер П.В. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – т. 4. – № 4. – С. 37–45.

8. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник токов преобразовательных блоков. – Челябинск: ЧГТУ. – 1995. – 355 с.

9. Хохлов Ю.И. Энерго- и ресурсосберегающие преобразовательные системы электроснабжения электролизного производства алюминиевой промышленности // Электрика. – 2007. – № 3. – С. 3–9.

10. Электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, В.Д. Константинов, П.В. Лонзингер // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – www.science-education.ru/117-13505 (дата обращения: 18.01.2015).

### References

1. Bobkov V.A. Rekonstrukciya preobrazovatel'nykh podstancij dlya pitaniya e'lektrolizerov alyuminiya / V.A. Bobkov, A.V. Bobkov // Silovaya e'lektronika. Tematicheskoe prilozhenie k zhurnalu «Komponenty i tehnologii». 2006. no. 4. pp. 66–68.
2. Zinov'ev G.S. Osnovy silovoj e'lektroniki. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. 672 p.
3. Pat. 1781793 Rossijskaya Federaciya. Upravlyaemyj vypryamitel; zayavl. opubl. 1992, Byul. 46 p.
4. Pat. 2333589. Rossijskaya Federaciya. Sposob upravleniya mnogofaznym vypryamitel'nyim agregatom / Yu.I. Xoxlov; zayavitel' i patentoobladatel' Yuzh.-Ural. gos. un-t. 2007109991/09; zayavl. 19.03.2007; opubl. 10.09.2008, Byul. no. 25. 13 p.
5. Ryzhov Yu.P. Dal'nie peredachi sverxvysokogo napryazheniya: uchebnik dlya vuzov. M.: Izdatel'skij dom ME'I, 2007. 488 p.
6. Fishler Ya.M. Transformatornoe oborudovanie dlya preobrazovatel'nykh ustanovok / Ya.L. Fishler, R.N. Uрманov, L.M. Pestryaeva. M.: E'nergoatomizdat, 1989. 320 p.
7. Khokhlov, Yu.I. Vneshnie i e'nergeticheskie karakteristiki dvenadcatifaznykh kompensirovannykh vypryamitelej s vektornym upravleniem / Yu.I. Xoxlov, V.I. Safonov, P.V. Lonzinger // Vestnik YuUrGU. Seriya «E'nergetika». 2014. t. 4. no. 4. pp. 37–45.
8. Khokhlov Yu.I. Kompensirovannye vypryamiteli s fil'traciej v kommutiruyushhie kondensatory nechetnokratnykh garmonik tokov preobrazovatel'nykh blokov. Chelyabinsk: ChGTU. 1995. 355 p.
9. Khokhlov Yu.I. E'nergo- i resursosberegayushhie preobrazovatel'nye sistemy e'lektrosnabzheniya e'lektroliznogo proizvodstva alyuminievoj promyshlennosti // E'lektrika. 2007. no. 3. p. 3–9.
10. E'lektromagnitnye processy v kompensirovannykh preobrazovatelyax s vektornym upravleniem / Yu.I. Xoxlov, V.I. Safonov, V.D. Konstantinov, P.V. Lonzinger // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 3. www.science-education.ru/117-13505 (data obrashheniya: 18.01.2015).

### 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, зав. кафедрой «Электромеханика и электромеханические системы», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.

Работа поступила в редакцию 16.02.2015.