

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОМПЕНСИРОВАННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

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

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Выполнено экспериментальное исследование некомпенсированного выпрямителя с векторным управлением с использованием лабораторного стенда на примере однофазной схемы. Показана возможность плавного регулирования напряжения нагрузки при векторном управлении. Управление осуществлялось посредством внесения 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 преобразователя, построенные на основании данных компьютерного и физического моделирования, которые качественно совпадают с теоретическими зависимостями. Показана линейность в обеих моделях регулировочных характеристик активного преобразователя, формирующего напряжение управления. Экспериментальные временные зависимости электромагнитных процессов и осциллограммы, полученные методом компьютерного моделирования, качественно согласуются между собой и с теоретическими данными.

Ключевые слова: некомпенсированный выпрямитель, векторное управление, регулирование напряжения нагрузки, система управления АИН, компьютерное моделирование.

Введение

Управление величиной выпрямленного напряжения является обязательным условием эффективного ведения производственных процессов, использующих мощный постоянный источник питания. В зависимости от отрасли изменяются необходимые диапазон и точность регулирования [1]. Дискретное регулирование осуществляется механически при помощи устройств регулирования под нагрузкой (РПН) трансформаторов. Плавное регулирование может осуществляться с использованием тиристорных выпрямителей [2] либо дросселей насыщения [3]. При использовании этих способов плавного регулирования реализуется фазовое управление выпрямленным напряжением преобразователя, характеризующееся возрастанием потребляемой им реактивной мощности с увеличением глубины регулирования [4].

Развитие элементной базы силовой электроники привело к созданию мощных активных преобразователей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), на зажимах переменного тока которых формируются напряжения, первые гармоники которых регулируются как по амплитуде, так и по фазе [5]. Включение таких устройств в контур питания ведомого сетью вентильного преобразователя позволяет производить практически безынерционное векторное управление его выпрямленным напряжением без увеличения потребляемой им реактивной мощности [6, 7]. Характеристики преобразователей, оборудованных устройством векторного управления, представлены в [8, 9]. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию выпрямителя с векторным регулированием.

Физическое моделирование

Материалы и методы исследования

Ввиду отсутствия в распоряжении трехфазного оборудования, эксперимент проводился в однофазном исполнении. Лабораторная установка (рис. 1) состоит из исследуемого некомпенсированного выпрямителя 1–3 и устройства векторного управления 4–13. Некомпенсированный выпрямитель представлен однофазным диодным мостом 1, сглаживающим реактором 2 и нагрузкой 3. Питание установки осуществляется от одной из фаз сети напряжением 220 В. Технические средства, улучшающие качество электроэнергии в точке подключения установки, не применялись.

Одна из обмоток вольтодобавочного трансформатора 10 включена в контур питания некомпенсированного выпрямителя. Для регулирования напряжения на выходе трансформатора 10 используется импульсный преобразователь электроэнергии [10], состоящий из активного выпрямителя 5 и автономного инвертора напряжения 7. Между собой активные преобразователи 5 и 7 соединены на стороне постоянного тока при помощи емкостного накопителя 6 (электролитический конденсатор). Силовые блоки преобразователей напряжения 5 и 7 выполнены в виде однофазных мостов, состоящих из IGBT-транзисторов со встречно включенными диодами и работающих в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Подключение активного выпрямителя напряжения 5 к сети осуществляется при помощи электромагнитного фильтра 4, обеспечивающего снижение высокочастотных гармоник, соответствующих частотному спектру широтно-импульсной модуляции преобразователя.

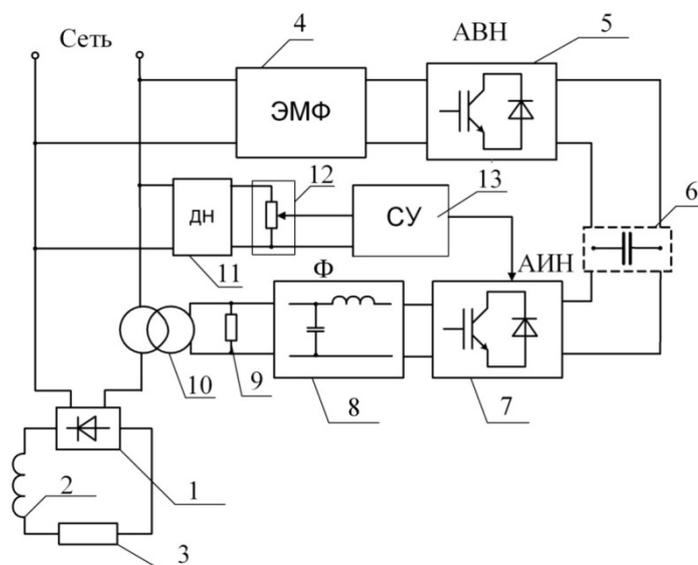


Рис. 1. Схема экспериментальной установки выпрямителя с векторным управлением

Активный выпрямитель 5 в системе выполняет две основные функции:

1) обеспечивает работу с сетью переменного тока, осуществляя двунаправленный поток электрической энергии с высокими энергетическими показателями ($\cos\phi \approx 1$ и коэффициент мощности $\chi \approx 1$), что достигается за счет формирования синусоидального тока, совпадающего по фазе или противофазного напряжению сети;

2) стабилизирует величину постоянного напряжения в звене постоянного тока.

Система управления АВН 5 построена по принципу подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и внешним контуром напряжения [10, 11].

Автономный инвертор напряжения 7 преобразует постоянное напряжение звена постоянного тока b в регулируемое переменное с частотой напряжения сети. Синхронизация системы управления инвертором 13 с напряжением сети осуществляется при помощи датчика напряжения 11. Регулирование амплитуды переменного задающего воздействия производится с помощью потенцио-

метра 12. Выделение первой гармоники напряжения с выхода импульсного преобразователя 7 производится пассивным Г-образным LC-фильтром 8. Переключение силовых транзисторов преобразователя 7 осуществляется в режиме однополярной ШИМ [11], что позволяет уменьшить пульсации тока на выходе в два раза по сравнению с двуполярной ШИМ, что, в свою очередь, положительно сказывается на массогабаритных размерах низкочастотного фильтра 8.

Резистор 9 предназначен для устранения опасных перенапряжений, возникающих в процессе включения установки.

Основные типы и параметры оборудования экспериментальной установки (см. рис. 1) приведены в таблице.

Измерения токов (напряжений), а также снятие осциллограмм осуществлялось с помощью информационно-измерительной системы стенда, включающей измерительные приборы (амперметры, вольтметры, мультиметры), датчики напряжения (тока), плату сопряжения датчиков с компьютером и программное обеспечение Delta Profi.

Таблица

Тип оборудования	Параметры
Диодный мост 1	–
Сглаживающий реактор 2	Индуктивность 6 Гн
Нагрузка 3	Дискретное изменение в диапазоне 400–3370 Ом
Импульсный преобразователь энергии 4–7	Напряжение питания ~220 В, мощность 300 ВА, входное напряжение до ~250 В, частота коммутации силовых ключей 12,5 кГц
LC-фильтр 8	$L = 10$ мГн, $C = 2$ мкФ
Резистор 9	$R = 1600$ Ом
Понижающий трансформатор 10	ОСМ1 - 0,063 ВА - 220 В - 42 В

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, а приведены экспериментальные внешние характеристики $U_d(I_d)$ управляемого некомпенсированного выпрямителя, полученные методом физического моделирования, при различных значениях коэффициентов модуляции АИН μ для двух режимов работы: 1) $\rho = 0^\circ$ – напряжение управления (напряжения на последовательной обмотке трансформатора I_0) находится в фазе с напряжением сети; 2) $\rho = 180^\circ$ – напряжения управления и сети находятся в противофазе. Здесь U_d, I_d – напряжение и ток на выходе выпрямителя.

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. 2, а точками показаны экспериментальные данные для одной серии опытов.

Для каждого опыта построена прямая регрессионная зависимость $U_d(I_d) = U_{d0} - XI_d$, коэффициенты в которой получены методом наименьших квадратов. Относительные ошибки в определении коэффициентов для каждого опыта составляли от 0,1 до 0,85 % (для U_{d0}) и от 10 до 39 % (для X), коэффициент корреляции изменялся от 0,95 до 0,996. Регрессионные зависимости показаны на рис. 2, а линиями.

Расчетные коэффициенты U_{d0} были использованы для построения регрессионной зависимости $U_{d0}(\mu) = E - \Delta E\mu$. Относительные ошибки в определении коэффициентов составляли 1,7 % (для E) и 25,6 % (для ΔE), коэффициент корреляции 0,978.

На рис. 3, а приведена регулировочная характеристика выпрямителя $U_{d0}(\mu)$ на холостом ходу (напряжение U_{d0}) от условного значения коэффициента модуляции μ , построенная по результатам физического моделирования. 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. Зависимость $U_{d0}(\mu)$ показана точками для расчетных значений U_{d0} в каждом из опытов для рассчитанной регрессионной функции.

Значения напряжения холостого хода без регулирования E и добавочного напряжения ΔE были измерены вольтметром с относительной ошибкой 0,5 %. В обоих случаях результаты измерений попали в доверительный интервал, полученный при статистической обработке опытных данных.

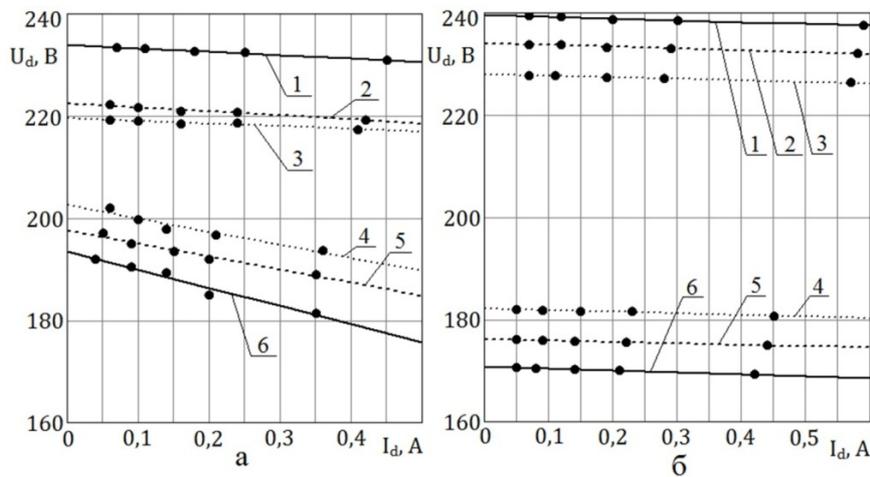


Рис. 2. Внешние характеристики управляемого выпрямителя, снятые при помощи физического (а) и компьютерного (б) моделирования (1 – $\mu = 0,75, \rho = 0^\circ$; 2 – $\mu = 0,63, \rho = 0^\circ$; 3 – $\mu = 0,5, \rho = 0^\circ$; 4 – $\mu = 0,5, \rho = 180^\circ$; 5 – $\mu = 0,63, \rho = 180^\circ$; 6 – $\mu = 0,75, \rho = 180^\circ$)

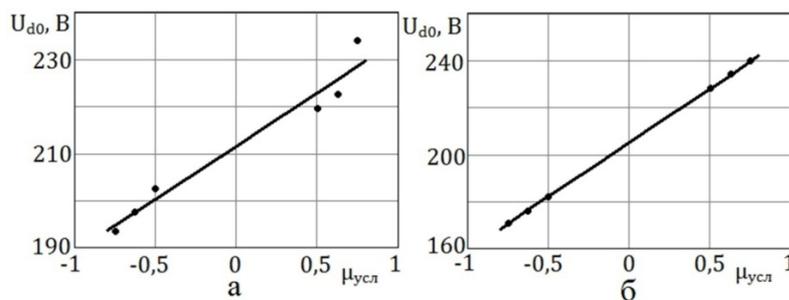


Рис. 3. Регулировочные характеристики выпрямителя на холостом ходу, снятые при помощи физического (а) и компьютерного (б) моделирования

Теория выпрямителя с векторным управлением [8] была развита с учетом допущений, характерных для мощных установок, когда активные сопротивления элементов системы много меньше индуктивных. В экспериментальном исследовании на учебном лабораторном стенде это допущение не выполняется. Поэтому сравнение теоретических и экспериментальных результатов 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 неправильных (ошибочных) данных в исходной выборке. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлено, что внешние характеристики выпрямителя являются линейными функциями, что соответствует теории. Кроме того, установлено, что зависимость $U_{d0}(\mu)$ является линейной функцией, что также ожидаемо.

На рис. 4 приведены осциллограммы токов и напряжений на элементах исследуемой схемы. Данные были получены при $\rho = 0^\circ$ и $\mu = 0,75$ и сопротивлении нагрузки, равном 1220 Ом. На осциллограмме рис. 4, а видно, что напряжение управления (2) находится в фазе с напряжением сети (1). Таким образом, на рис. 4, г амплитуда входного напряжения выпрямителя (1) больше амплитуды напряжения сети (2). Анализ полученных осциллограмм с учетом уменьшения амплитуды напряжения управления в соответствии с коэффициентом трансформации $K_T = 220/42$ транс-

форматора 10 показал адекватность результатов общим законам электротехники, записанных для первой гармоники. В напряжении управления (рис. 4, а) очевидно наличие высших гармоник, что объясняется ограничениями минимального и максимального коэффициентов заполнения включения силовых ключей преобразователя 7, а также искажениями формы сигнала управления (напряжения сети) на входе системы управления 13. Выпрямленное напряжение (рис. 4, в) и входной ток выпрямителя (кривая 2 на рис. 4, б) имеют вид, характерный для однофазного мостового выпрямителя с большой индуктивностью в цепи нагрузки. Первая гармоника сетевого тока находится в фазе с напряжением питающей сети (кривые 1 на рис. 4, а, б).

Компьютерное моделирование

В программе MatLab+Simulink была разработана компьютерная модель экспериментальной установки, функциональная схема которой была приведена на рис. 1. Параметры моделирования были выбраны согласно таблице.

Изменяя сопротивление нагрузки и коэффициент модуляции аналогичным физическому моделированию образом, мы получили внешние характеристики исследуемой компьютерной модели, показанные на рис. 2, б (показаны точками). Аналогично получены регрессионные зависимости (показаны линиями) с относительными ошибками в определении коэффициентов, лежащими в диапазоне от 0,04 до 0,09 % (для U_{d0}) и от 8 до 20 % (для X), коэффициент корреляции изменялся от 0,986 до 0,998. Из сравнения внешних характе-

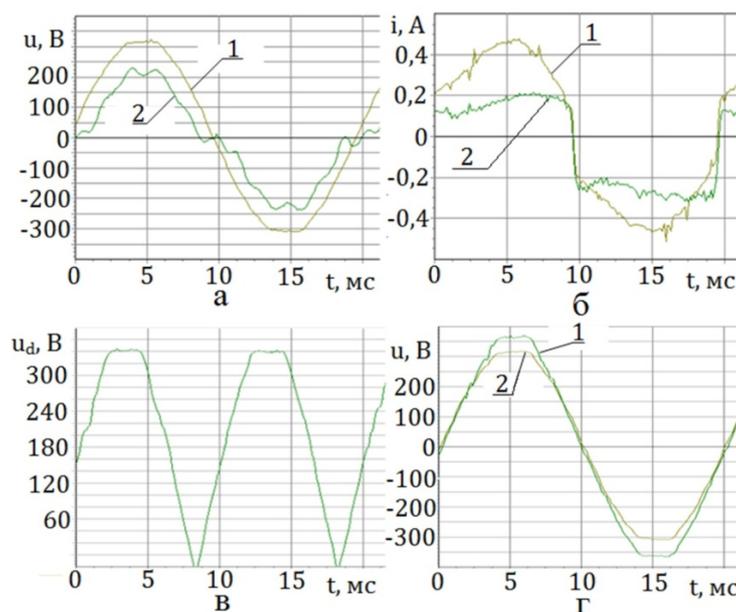


Рис. 4. Осциллограммы напряжений и токов: а – напряжения сети (1) и вольтодобавочного напряжения (2); б – тока сети (1) и входного тока выпрямителя (2); в – выпрямленного напряжения; г – напряжения сети (2) и входного напряжения выпрямителя (1)

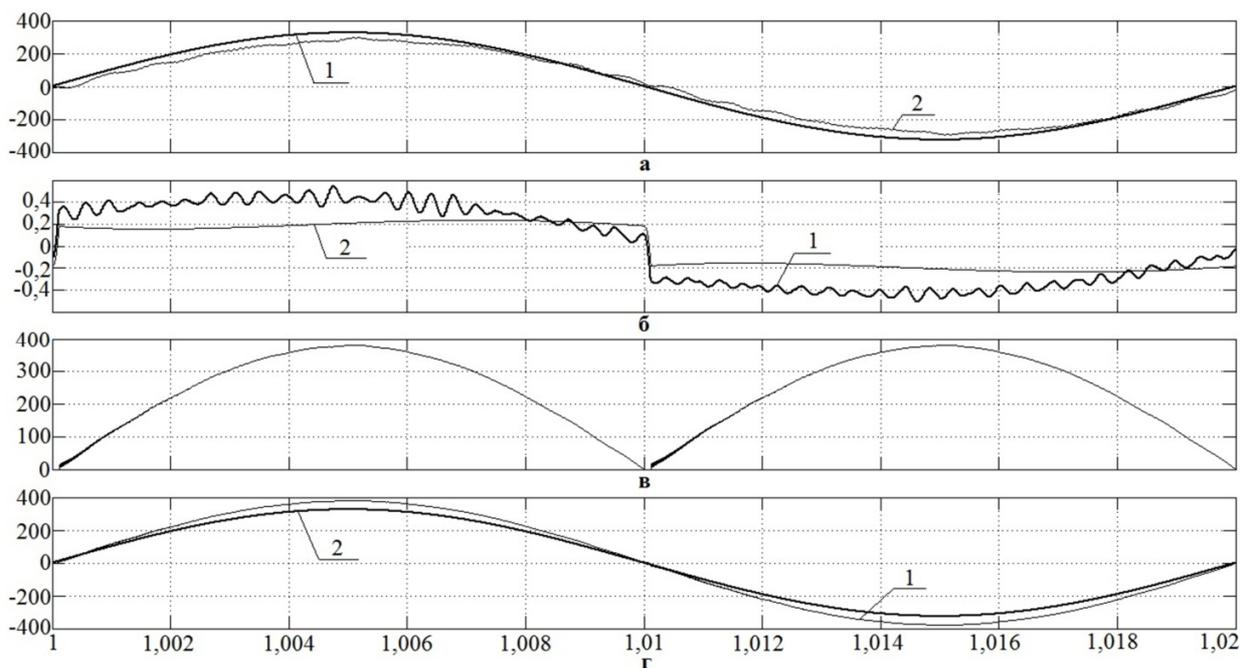


Рис. 5. Временные зависимости токов и напряжений, полученные при помощи компьютерного моделирования: а – напряжения сети (1) и вольтодобавочного напряжения (2); б – тока сети (1) и входного тока выпрямителя (2); в – выпрямленного напряжения; г – напряжения сети (2) и входного напряжения выпрямителя (1)

ристик, полученных на физической (см. рис. 2, а) и компьютерной моделях, видно значительное их различие как по жесткости, так и по значениям выпрямленных токов и напряжений. Причины расхождений объясняются следующими факторами.

1. При проведении исследования на реальной физической модели напряжения питающей сети и управления содержат значительные гармонические составляющие (см. рис. 4), что отсутствует при компьютерном моделировании (рис. 5). Указанное обстоятельство сильно влияет на величину выпрямленного напряжения вентильного моста.

2. Используемые в модели параметры вольтодобавочного трансформатора не учитывают изменения активных сопротивлений его обмоток с течением времени при проведении эксперимента.

3. Различие мощностей короткого замыкания в точке подключения исследуемой системы к питающей сети при компьютерном и физическом моделированиях.

4. Погрешность при определении коэффициента модуляции.

Аналогично физическому моделированию на рис. 3, б построена регрессионная зависимости $U_{d0}(\mu) = E - \Delta E\mu$. Относительные ошибки в определении коэффициентов составляли 0,03 % (для E) и 0,2 % (для ΔE), коэффициент корреляции 1. В отличие от физического моделирования, регулировочная характеристика преобразователя в компьютерной модели значительно ближе к линейной зависимости.

Осциллограммы токов и напряжений, получен-

ные в компьютерной модели при $\rho = 0^\circ$, $\mu = 0,75$ и сопротивлении нагрузки, равном 1220 Ом, показаны на рис. 5. Осциллограммы качественно совпадают с экспериментальными временными диаграммами, полученными при физическом моделировании (см. рис. 4). В количественном соотношении разница между физическим и компьютерным моделированиями при сравнении амплитудных значений токов напряжений объясняется вышеперечисленными факторами, а также наличием высокочастотных помех, создаваемых импульсным преобразователем 4-13 (см. рис. 1).

Таким образом, можно говорить о качественном соответствии между экспериментальными данными и зависимостями, полученными методами физического и компьютерного моделирования, а также о качественном соответствии временных диаграмм, полученных в модели, теоретическим зависимостям.

Выводы

1. Экспериментально продемонстрирована возможность плавного изменения выпрямленного напряжения некомпенсированного выпрямителя посредством применения векторного управления, осуществляемого импульсным преобразователем, состоящим из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения.

2. Полученные методами физического и компьютерного моделирования внешние характеристики преобразователя с векторным управлением качественно согласуются с теоретическими зависимостями.

3. Показана линейность регулировочной характеристики импульсного преобразователя с векторным управлением.

4. Показано качественное соответствие между экспериментальными временными зависимостями, теоретическими кривыми и осциллограммами, полученными методом компьютерного моделирования.

Литература

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

2. Бобков, В.А. Реконструкция преобразовательных подстанций для питания электролизеров алюминия / В.А. Бобков, А.В. Бобков // Силовая электроника. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». – 2006. – № 4. – С. 66–68.

3. Пат. 1781793 Российская Федерация. Управляемый выпрямитель / Ю.И. Хохлов // Бюл. изобр. – 1992. – № 46.

4. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧГТУ. – 1995. – 355 с.

5. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.

6. Хохлов, Ю.И. Энерго- и ресурсосберегающие преобразовательные системы электроснаб-

жения электролизного производства алюминиевой промышленности / Ю.И. Хохлов // Электрика. – 2007. – № 3. – С. 3–9.

7. Пат. 2333589. Российская Федерация. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Ю.И. Хохлов; заявитель и патентообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. – 2007/109991/09; заявл. 19.03.2007; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 13 с.

8. 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: 06.05.2015).

9. Хохлов, Ю.И. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 4 – С. 37–45.

10. Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 5–18.

11. Дудкин, М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 2 (38). – С. 25–32.

Хохлов Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Khokhlov@energo.susu.ac.ru.

Дудкин Максим Михайлович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dudkinmax@mail.ru.

Сафонов Валерий Иванович, канд. физ.-математических наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; val-iv-s@yandex.ru;

Лонзингер Петр Владимирович, аспирант, кафедра «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, e-mail: lpw91@mail.ru.

Поступила в редакцию 6 мая 2015 г.

DOI: 10.14529/power150306

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF UNCOMPENSATED RECTIFIER WITH VECTORIAL CONTROL

Yu.I. Khokhlov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, Khokhlov@energo.susu.ac.ru,

M.M. Dudkin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dudkinmax@mail.ru,

V.I. Safonov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, val-iv-s@yandex.ru,

P.V. Lonzinger, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, lpw91@mail.ru

An experimental research of a uncompensated rectifier with vectorial control was delivered with using of laboratory equipment. The research was carried out in a single-phase circuit as an example. An possibility

of an output load voltage control by means of vectorial control was shown. The control was realized by means 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. Experimental output performances of the rectifier were obtained. The performances were plotted with using of data of physical and computer simulations. These dependences correspond to theory of electromagnetic processes in the rectifier. A linearity of active inverter's (that creates control voltage) adjustment characteristics obtained in both simulations was illustrated. Oscilloscope traces of electromagnetic processes received in both simulations correspond to each other and to the theory.

Keywords: power transformer, vector control, voltage regulation on load, computer simulation.

References

1. Fishler Ya.M., Urmanov R.N., Pestryaeva L.M. *Transformatornoe oborudovanie dlya preobrazovatel'nykh ustanovok* [Transformer Equipment for Converter's Plants]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 320 p.
2. Bobkov V.A., Bobkov A.V. [Reconstruction of Aluminium Electrolytic Tanks' Converter Substations]. *Power electronics*, 2006, no. 4, pp. 66–68. (in Russ.)
3. Khokhlov Yu.I. *Upravlyayemyy vypryamitel'* [Controlled Rectifier]. Patent RF, no. 1781793, 1992.
4. Khokhlov Y.I. *Kompensirovannyye vypryamiteli s fil'tratsiey v kommutiruyushchie kondensatory nechetno-kratnykh garmonik tokov preobrazovatel'nykh blokov* [Compensated Rectifiers with a Filtration of Rectifier Assemblies' Odd-multiple Currents' Harmonics in Switching Capacitors], Chelyabinsk, ChGTU Publ., 1995. 355 p.
5. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Basis of the Power Electronics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2004. 672 p.
6. Khokhlov Yu.I. [Energy-saving and Resource-saving Power-supply Systems for Electrolytic Aluminium Industry]. *Electrics*, 2007, no. 3, pp. 3–9 (in Russ.)
7. Khokhlov Y.I. *Sposob upravleniya mnogofaznym vypryamitel'nyim agregatom* [Method of Controlling Multiphase Rectifier]. Patent RF, no. 2333589, 2008.
8. Khokhlov Y.I., Safonov V.I., Konstantinov V.D., Lonzinger P.V. [Electromagnetic Processes in Compensated Converters with Vectorial Control]. *Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 3. Available at www.science-education.ru/117-13505 (accessed 6 May 2015). (in Russ.)
9. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzinger P.V. [Output and Power Performances of Twelve-phase Compensated Rectifiers with Vectorial Control]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 4 pp. 37–45. (in Russ.)
10. Dudkin M.M. [Energy-Efficient Technologies in Test Beds with Application of Single-Phase Reversible Converters]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no.1 pp. 5–18. (in Russ.)
11. Dudkin M.M. [Power Performances of Single-phase Reversible Voltage Converters with Different Laws of Modulation]. *Practical Power Electronics*, 2010, no. 2 (38), pp. 25–32. (in Russ.)

Received 6 May 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Экспериментальное исследование некомпенсированного выпрямителя с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, М.М. Дудкин, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 45–51. DOI: 10.14529/power150306

FOR CITATION

Khokhlov Yu.I., Dudkin M.M., Safonov V.I., Lonzinger P.V. Experimental Investigation of Uncompensated Rectifier with Vectorial Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 45–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150306