

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

RATIONALE FOR REALIZATION OF PHASE-SHIFTING DEVICE WITH CODE ADJUSTMENT DEPENDING ON FREQUENCY OF VOLTAGE

V. G. Sugakov, N. S. Varlamov, Yu. S. Malyshev

Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Analysis of control systems of semiconductor converter shows that the deviation of the network frequency negatively affects some consumers of electrical energy on ship, in particular, the phase-shifting devices that it is part of the control system of valve converter. As a result, an error appears in the formation of a given control angle, which leads to a change in the output parameters of the converter and a deterioration in its adjustment characteristics. The object of the research is a three-phase rectifier; it performed based on a semi-controlled bridge circuit. The purpose of the study is to reduce the sensitivity to changing the frequency of the input voltage and improve the control characteristics of the controlled rectifier. For this objective, simulation models of the channels of the control system of a controlled rectifier with various types of phase-shifting devices have been developed and investigated. The output mean value of rectified voltage of the converter was measured with variation of voltage frequency and variation of control angle. The processing of data obtained because of modeling a rectifier used as a source of power for the active load is presented. Comparison of simulation results showed that the presence of a memory block consisting of a digital phase-shifting system could reduce error of the mean of the rectified voltage output from the controlled rectifier. The results of research show practical possibility of realization control system based on the proposed digital phase-shifting device with resistance to frequency variations in the supply network. The realized system control is advisable to apply in the structure of a controlled rectifier in order to reduce the error of the output mid-rectified voltage when supplying from voltage sources on ship.

Keywords: phase-shifting device, instability voltage frequency, control system, semiconductor converters, imitation model.

For citation:

Sugakov, Valerij G., Nikita S. Varlamov, and Yury S. Malyshev. "Rationale for realization of phase- shifting device with code adjustment depending on frequency of voltage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837.

УДК 621.316.722.3

ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С КОРРЕКЦИЕЙ КОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ

В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Анализ систем управления полупроводниковых преобразователей показывает, что отклонение частоты сети оказывает негативное влияние на ряд судовых потребителей электрической энергии, в частности, на фазосмещающие устройства, входящие в состав системы управления вентильным преобразователем. В результате этого появляется погрешность формирования заданного угла управления, что приводит к изменению выходных параметров преобразователя и ухудшению его регулировочных характеристик. Объектом исследования является трехфазный выпрямитель, выполненный на основе полупроводимой мостовой схемы. Задачей исследования являются снижение чувствительности к изменению частоты входного напряжения и улучшение регулировочных характеристик управляемого выпрямителя. С этой целью разработаны

и исследованы имитационные модели каналов системы управления управляемого выпрямителя с различными типами фазосмещающих устройств. Измерения выходного среднего значения выпрямленного напряжения преобразователя проводились при изменениях частоты напряжения и угла управления. Представлена обработка данных, полученных в результате моделирования выпрямителя, используемого в качестве источника питания активной нагрузки. Сопоставление результатов моделирования показало, что наличие блока памяти в составе цифрового фазосмещающего устройства позволяет уменьшить погрешность среднего значения выпрямленного напряжения с выхода управляемого выпрямителя. Результаты исследования показывают практическую возможность реализации системы управления на базе предложенного цифрового фазосмещающего устройства с устойчивостью к отклонениям частоты питающей сети. Реализованную систему управления целесообразно применять в составе управляемого выпрямителя с целью уменьшения погрешности выходного средневыпрямленного напряжения при питании от судовых источников напряжения.

Ключевые слова: фазосмещающее устройство, нестабильность частоты, системы управления, полупроводниковый преобразователь, имитационная модель.

Для цитирования:

Сугаков В. Г. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837.

Введение

Фазосмещающее устройство (ФСУ) является важным компонентом системы управления полупроводниковым преобразователем. Функция ФСУ сводится к преобразованию управляющего сигнала u_y в угол управления α , отсчитываемый от момента естественной коммутации вентиля полупроводникового преобразователя [1].

В реальных режимах судовой электростанции вследствие изменения генерируемой и потребляемой мощности происходит изменение частоты питающей сети, что влечет за собой ряд негативных последствий [2], [3], а именно: снижение КПД механизмов, рост потребления активной и реактивной мощностей, снижение перегрузочной способности асинхронного двигателя и др. Изменение частоты питающей сети оказывает большое влияние на режимы работы систем управления полупроводниковых преобразователей электрической энергии, вследствие чего наблюдается увеличение погрешности задания угла управления α .

Правилами Российского речного регистра к отклонениям напряжения и частоты от номинальных значений устанавливается следующая норма: *изменение частоты питающего напряжения не должно превышать 10 % при кратковременном отклонении и 5 % — при длительном* [4]. Согласно [5], отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками не должно превышать ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Использование обратной связи или схем умножения частоты для корректировки частоты импульсов с выхода генератора опорного напряжения нашло свое применение в ФСУ при питании от источников ограниченной мощности [6]. Недостатком данных ФСУ является невозможность равномерного изменения угла управления при изменении частоты напряжения. В связи с этим предложено цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) [7], [8], которое за счет коррекции кода в зависимости от частоты напряжения обеспечивает практически плавное изменение заданного угла управления и высокую его стабильность в условиях нестабильности частоты питающей сети.

Материалы и методы

Модель полупроводникового преобразователя с системой управления на базе ФСУ устройств различных типов. Наиболее широкое применение в установках различных типов находят трехфазные схемы, при этом в большинстве судовых преобразовательных устройств применяется трехфазная мостовая схема вентильных комплектов, обладающая относительно малой

Для исследования свойств полупроводникового преобразователя и оценки его относительной погрешности выходного напряжения с предложенными моделями каналов управления в условиях неустойчивости частоты питающей сети разработана модель управляемого выпрямителя в программном пакете MATLAB (номер лицензии 530479). Общий вид модели представлен на рис. 1 (рис. 1, 4 – 7 с высоким разрешением доступны по ссылке <https://journal.gumrf.ru/files/upload/art/9-4-5SVM.rar>).

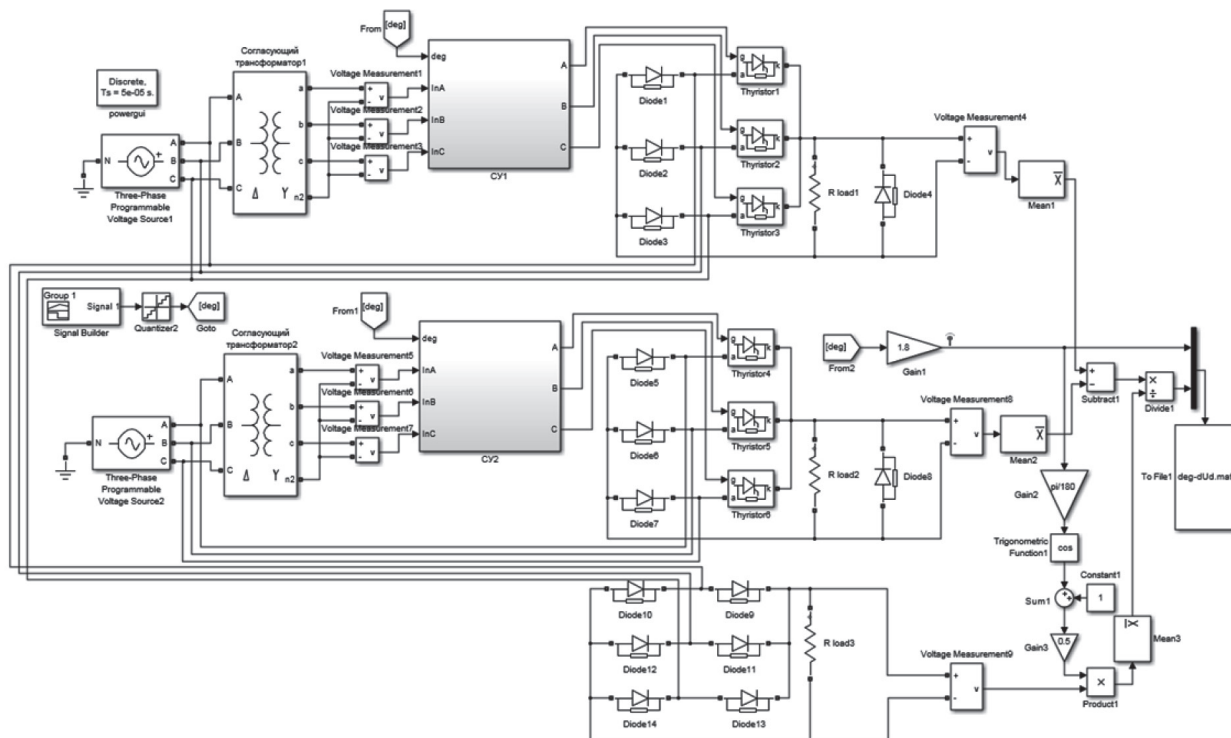


Рис. 1. Имитационная модель полупроводникового преобразователя

Изменение частоты напряжения у исследуемой модели задается непосредственно программируемым трехфазным источником напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source1* с выходным напряжением 400 В. К выходу источника напряжения подключен полупроводниковый преобразователь с активной нагрузкой *R load1*. Полупроводниковый преобразователь (ПП) представлен в виде трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя [9] — рис. 2, образованного тиристорами *Thyristor 1 ... 3* и диодами *Diode 1 ... 3*. Управляющие импульсы на вентили ПП формирует подсистема *CV1*, синхронизация с сетью которой осуществляется через согласующий трансформатор и элементы *Voltage Measurement 1 ... 3*. Согласующий трансформатор представлен в виде блока *Three-Phase Transformer1* с подключением обмоток по схеме Δ/Y -11 с напряжением первичной обмотки 400 В и вторичной — 5 В. Среднее значение выпрямленного напряжения с выхода *Mean1* $U_{d_{CV1}}$ для сравнения с эталонным поступает на положительный вход блока *Subtract1*.

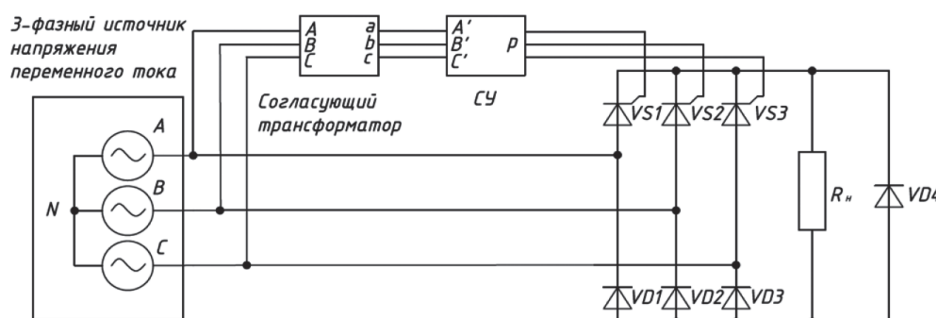


Рис. 2. Структурная схема полупроводникового выпрямителя

В качестве эталонной модели используется схема, образованная блоками *Three-Phase Programmable Voltage Source2* с постоянной частотой напряжения, *Three-Phase Transformer 2*, *Voltage Measurement 5 ... 7*, *Thyristor 4 ... 6*, *Diode 5 ... 7*, *R load 2* и подсистемой *CV2*. Среднее выпрямленное напряжение в эталонной модели с выхода *Mean2* U_{dcv2} поступает на отрицательный вход блока *Subtract1*.

Подсистемы *CV1* и *CV2* состоят из трех идентичных каналов, каждый из которых формирует управляющие импульсы в соответствии с фазой питающего напряжения. Задание углов управления осуществляется блоками *Signal Builder* и *Quantizer*.

При построении зависимостей в качестве базисной величины принято среднее значение выпрямленного напряжения U_{da} с выхода модели выпрямителя, образованной элементами *Diode 9 ... 13*, *R Load3*, *Voltage Measurement 9*, *Product 1*, *Gain 2 ... 3*, *Sum1*, *Constant1*, *Trigonometric Function 1* и функционирующей при изменяющейся частоте напряжения с выхода источника напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source1*. В качестве постоянной частоты напряжения источника эталонной модели принята промышленная частота, равная 50 Гц. В исследуемой модели изменение частоты напряжения находится в диапазоне 45 – 55 Гц, что соответствует требованиям правил Российского речного регистра судоходства. Моделирование выполнялось при неизменной активной нагрузке для всех измерений. Величина потребляемой мощности составляет 4 кВт.

Имитационные модели каналов систем управления полупроводниковым преобразователем электрической энергии. Общая структурная схема системы управления (СУ) полупроводниковым преобразователем (ПП) — рис. 3, а — содержит ФСУ, на вход которой подается сигнал управления g . Сигнал α с выхода ФСУ поступает на вход выходного формирователя (ВФ), на выходе которого появляются управляющие импульсы u , поступающие на вентили силового блока (СБ). Также СУ может иметь контур отрицательной обратной связи (ОС), на вход которого поступает какой-либо выходной параметр $u'(t)$ с преобразователя или объекта, получающего питание от преобразователя. На выходе блока ОС формируется напряжение u_{oc} , которое поступает на вход СУ в виде сигнала отрицательной обратной связи. В качестве сигнала для организации обратной связи могут использоваться такие параметры, как напряжение, сила тока, частота или частота вращения исполнительного механизма и т. д.

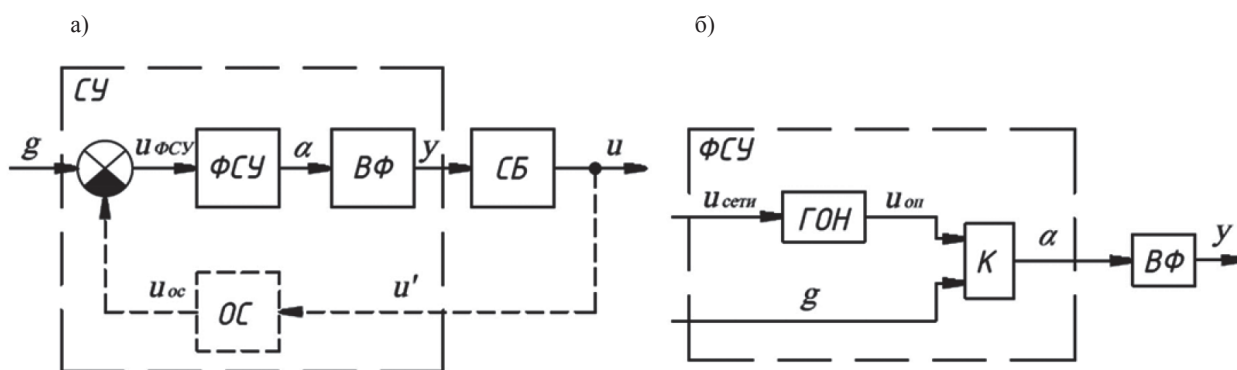


Рис. 3. Структурная схема системы управления полупроводниковым преобразователем (а) и ФСУ (б)

Основным элементом СУ любого преобразователя служит ФСУ (см. рис. 1, б), где на один вход компаратора поступает управляющее напряжение g , а на второй вход подается опорное напряжение $u_{оп}$ с выхода генератора опорного напряжения (ГОН). Компаратор (К) сравнивает входные напряжения g и $u_{оп}$. В момент равенства этих напряжений компаратор переключается, и на его выходе появляется сигнал α , поступающий на выходной формирователь.

Имитационная модель одного канала СУ на базе дискретного фазосмещающего устройства (ДФСУ), работающего по «вертикальному» принципу, приведена на рис. 4 [1]. Элемент *Relay1* является входом модели устройства, на который подается синхронизированное синусоидальное напряжение. Элементы *Integrator1*, *Gain1* и *Subtract1* обеспечивают имитацию вычитающего счетчика. При этом на первый вход вычитающего счетчика подаются импульсы стабильной частоты с генератора импульсов стабильной частоты, представленного элементом *Pulse Generator*. Сигнал сброса, сформированный элементами *Relay1* и *Hit Crossing1* в моменты естественной коммутации, поступает на вход сброса вычитающего счетчика. Элемент *Relation Operator1* является компаратором, который формирует сигнал прямоугольной формы при соблюдении неравенства двух сигналов: спадающего сигнала с выхода вычитающего счетчика и сигнала, пропорционального углу управления α (выход элемента *Subtract2*).

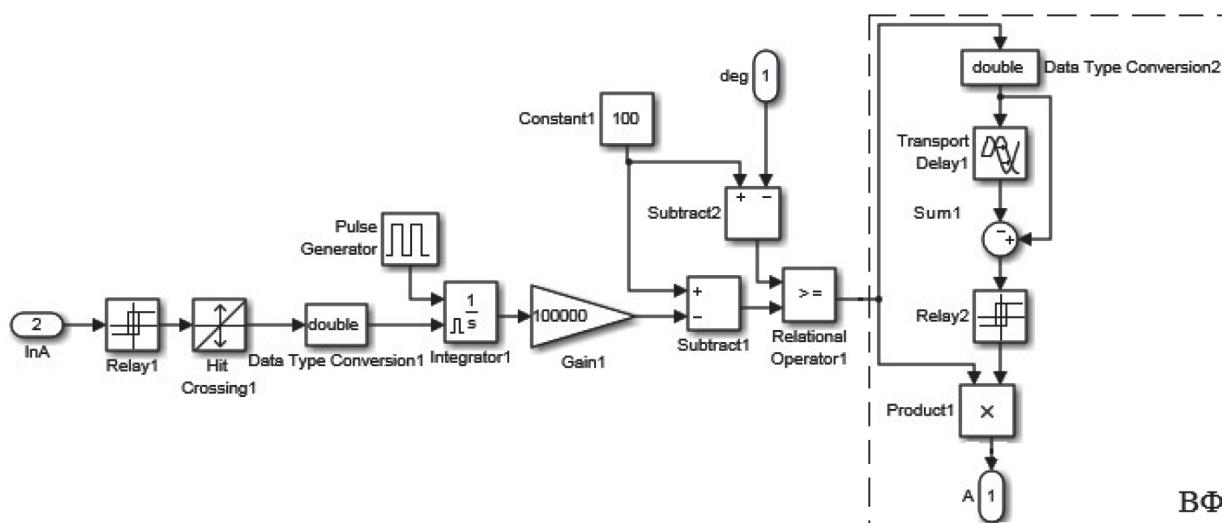


Рис. 4. Блок-схема имитационной модели одного канала с ДФСУ

Имитационная модель канала с ЦФСУ [7] представлена на рис. 5. Синхронизированное напряжение синусоидальной формы поступает на формирователь прямоугольных импульсов элементом *Relay1*. Прямоугольный импульс с выхода *Relay1* поступает на первый логический элемент И *Logical Operator2* и через логический элемент НЕ *Logical Operator1* на второй логический элемент И *Logical Operator3*, к первым входам которых поступают импульсы стабильной частоты с *Pulse Generator*. Суммирующий счетчик (элементы *Integrator2* и *Gain2*) формирует нарастающий сигнал, конечное значение которого пропорционально половине периода отрицательной полуволны напряжения. Этот сигнал поступает далее на второй вход блока памяти и на вход вычитающего счетчика. Блок памяти *2-D Lookup Table1* формирует сигнал в зависимости от угла управления α (выход элемента *deg*) и отрицательной половины периода напряжения. По адресам блока памяти записаны значения задающего сигнала, соответствующие частоте питающего напряжения и заданному углу управления.

Из элементов *Integrator1*, *Gain2*, *Sum3*, *Abs1*, *Sum4* и *Gain3* собран вычитающий счетчик, который формирует спадающий сигнал при положительной полуволне напряжения. При соблюдении неравенства сигналов с выходов вычитающего счетчика и блока памяти элемент *Relation Operator1* формирует сигнал прямоугольной формы, фаза которого соответствует необходимому углу управления. Далее этот сигнал поступает на ВФ.

Элементы *Transport Delay2*, *Sum2*, *Relay3* и *Transport Delay1*, *Sum1*, *Relay2* образуют первый и второй формирователи импульсов. По фронту прямоугольного сигнала с выхода элементов *Sum1* и *Relay1* формирователи генерируют короткие импульсы, которые сбрасывают значения сигналов суммирующего и вычитающего счетчиков.

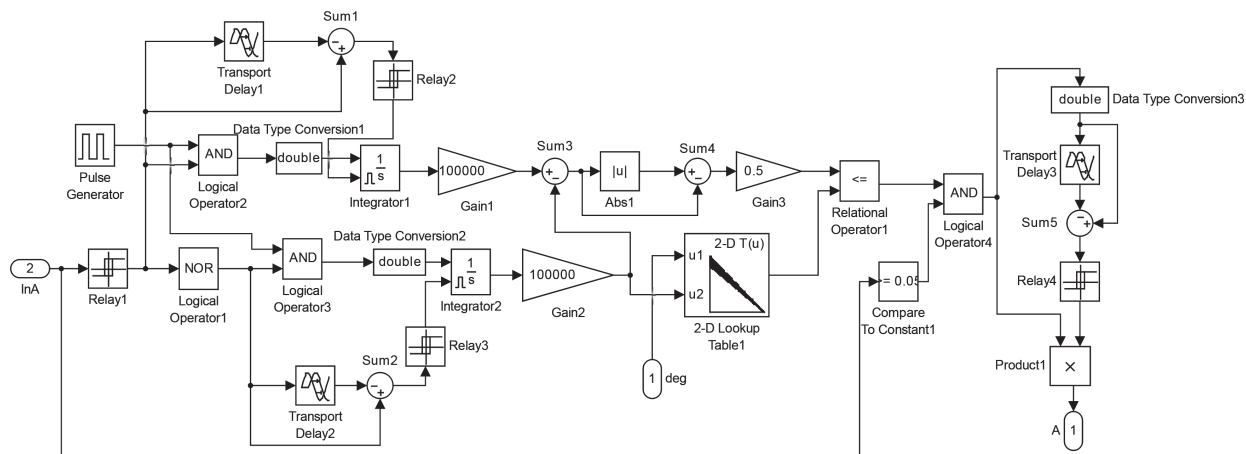


Рис. 5. Блок-схема имитационной модели одного канала с ЦФСУ

При изменении частоты питающего напряжения (например, при её уменьшении) на выходе элемента *Integrator2* будет сформировано большее значение сигнала, который поступит на первый вход блока памяти *2-D Lookup Table1*. При этом на выходе *2-D Lookup Table1* появится большее значение сигнала, и равенство значений сигналов с выходов *2-D Lookup Table1* и *Integrator1* наступит позже. Фаза сигнала угла управления α будет соответствовать мгновенному значению U_a питающего напряжения так же, как при номинальной частоте. *Compare To Constant1* и *Logical Operator4* выполняют функцию ограничения максимального и минимального угла управления. Кроме того, в моделях каналов с ЦФСУ и ДФСУ присутствуют выходные формирователи, состоящие из блоков *Data Type Conversion3*, *Transport Delay3*, *Sum5*, *Relay4* и *Product1* (ЦФСУ) и *Data Type Conversion2*, *Transport Delay1*, *Sum1*, *Relay2* и *Product1* (ДФСУ). ВФ работают аналогично формирователям коротких импульсов, описанных в модели ЦФСУ. Элементы модели *Gain 1...3* и *Data Type Conversion 1 ... 3* предназначены для преобразования значений и типов сигналов внутри подсистемы.

Результаты исследования

Проведено исследование имитационной модели ПП на характер влияния изменения частоты питающего напряжения для различных моделей каналов СУ. По результатам имитационного моделирования ПП с различными видами каналов СУ были построены характеристики зависимостей относительной погрешности среднего выпрямленного напряжения от величины угла управления α , представленные на рис. 6. При этом относительная погрешность среднего выпрямленного напряжения δU_d определялась выражением

$$\delta U_d = \frac{U_{dCY1} - U_{dCY2}}{U_{d\alpha}}.$$

Из характеристик (рис. 6, а) следует, что при работе ПП с ДФСУ в диапазоне угла управления $\alpha = 90 \dots 130^\circ$ наблюдается увеличение погрешности δU_d на исследуемых частотах. При этом диапазон значений относительной погрешности δU_d составляет от $-0,42$ до $0,5$ при изменении частоты напряжения от 45 Гц до 55 Гц. Также по мере изменения угла управления к минимальному углу или частоты напряжения в сторону номинальной величина погрешности δU_d уменьшается.

При проведении аналогичного моделирования ПП с ЦФСУ (рис. 6, б) при тех же условиях диапазон величин δU_d изменяется в интервале от $-0,074$ до $0,052$. Также наблюдаются пересечения характеристик через ноль. Максимумы характеристик зафиксированы на разных интервалах регулирования угла управления. Кроме того, наблюдается снижение разброса максимального угла управления (рис. 6, в).

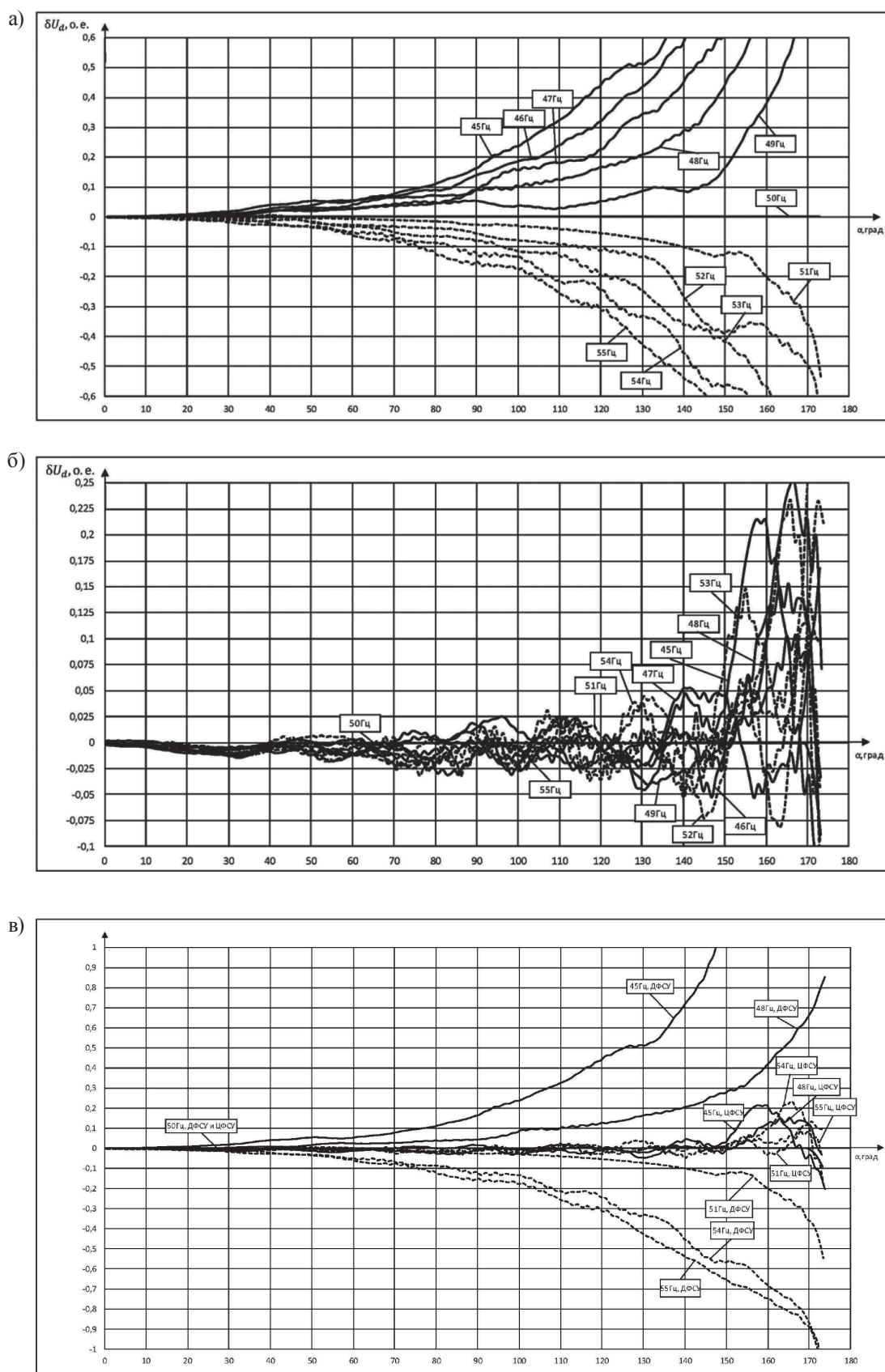


Рис. 6. Зависимости относительной погрешности выпрямленного напряжения от угла управления при работе ПП с ДФСУ (а), ЦФСУ (б) и с ДФСУ и ЦФСУ (в)

Таким образом, выполненный анализ моделей доказывает, что управляемый выпрямитель совместно с ЦФСУ по сравнению с ДФСУ имеет меньшую погрешность задания углов управления при изменении частоты напряжения, что способствует стабилизации выходных параметров с выхода ПП и, следовательно, повышению его эффективности в условиях неустойчивости частоты питающего напряжения.

Заключение

Предложенное ЦФСУ обеспечивает высокую стабильность заданного угла управления и практически плавное его изменение в условиях неустойчивости частоты питающего напряжения. Результаты моделирования управляемого выпрямителя с ЦФСУ свидетельствуют о возможности и целесообразности его практической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин; под ред. В. А. Лабунцова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 320 с.
2. Иванов А. В. Анализ влияния параметров напряжения на работу асинхронных машин / А. В. Иванов, Э. А. Бекиров, М. М. Асанов // Строительство и техногенная безопасность. — 2016. — № 3 (55). — С. 67–71.
3. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
4. Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. — М.: Российский речной регистр, 2017. — Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). — 1885 с.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с.
6. Пат. 2373624 Российская Федерация, МПК H02M 1/08 Фазосдвигающее устройство / Л. И. Цытович, М. М. Дудкин, А. В. Качалов, Р. М. Рахматулин; заяв. и патентообл. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет». — № 2008142656/09; Заявл. 27.10.2008; Оpubл. 20.11.2009; Бюл. № 32. — 15 с.
7. Пат. 2612055 Российская Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Н. С. Варламов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта». — № 2015155112; Заявл. 22.12.2015; Оpubл. 02.03.2017; Бюл. № 7. — 6 с.
8. Сугаков В. Г. Применение фазосмещающего устройства в условиях неустойчивости частоты питающего напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, А. И. Мешков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. — Н.Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2016. — С. 168–172.
9. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by Muhammad H. Rashid. — 3rd ed. — Elsevier Inc., 2011. — 1390 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3.
10. Климаш В. С. Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью / В. С. Климаш, Йе Мин Тху // Электротехнические системы и комплексы. — 2016. — № 4 (33). — С. 78–86. DOI:10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86.
11. Белоус А. И. Полупроводниковая силовая техника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. — М.: Техносфера, 2013. — 216 с.

REFERENCES

1. Gorbachev, G. N., and E. E. Chaplygin. *Promyshlennaya ehlektronika*. M.: Ehnergoatomizdat, 1988.
2. Ivanov, A. V., E. A. Bekirov, and M. M. Asanov. "Analysis of network voltage parameters effect on operation on asynchronous machines." *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* 3(55) (2016): 67–71.
3. Fuchs, Ewald, and Mohammad A. S. Masoum. *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press, 2015. DOI:10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

4. *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra. Vol. 2.* M.: Rossiiskii rechnoi registr, 2017.
5. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M: Standartinform, 2013.
6. Cytovich, L. I., M. M. Dudkin, A. V. Kachalov, and R. M. Rahmatulin. RU 2 373 624, IPC H 02 M 1/08. Fazosdvigayushchee ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Nov. 2009.
7. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, and N. S. Varlamov. RU 2 612 055, IPC G 01 R 25/00. Cifrovoe fazosmeshchayushchee ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 2 March 2017.
8. Sugakov, V. G., N. S. Varlamov, and A. I. Meshkov. "Primenenie fazosmeshchayushchego ustroistva v usloviyakh nestabil'nosti chastoty pitayushchego napryazheniya." *Aktual'nye problemy elektroenergetiki: sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2016: 168–172.
9. Rashid, Muhammad H., ed. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook. 3rd ed. Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3.
10. Klimash, Vladimir S., and Thu Je Min. "Generic mathematical description and modeling of thyristor converters controlled by power line." *Electrotechnical Systems and Complexes* 4(33) (2016): 78–86. DOI:10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86.
11. Belous, A. I. *Poluprovodnikovaya silovaya tekhnika*. M.: Tekhnosfera, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сугаков Валерий Геннадьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru
Варламов Никита Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Сугаков Валерий Геннадьевич
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: varlamov_nikita@mail.ru
Малышев Юрий Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: elektrikasp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sugakov, Valerij G. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951,
Russian Federation
e-mail: elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru
Varlamov, Nikita S. — Postgraduate
Supervisor:
Sugakov, Valerij G.
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951,
Russian Federation
e-mail: varlamov_nikita@mail.ru
Malyshev, Yury S. —
PhD, associate professor
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951,
Russian Federation
e-mail: elektrikasp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2017 г.
Received: May 24, 2017.