

УДК 621.316.722.3

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. МалышевВолжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО
ФАЗОСМЕЩАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПОВЫШЕННОЙ
РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ПО ВРЕМЕНИ**

Функционирование судового электрооборудования тесно связано с качеством электрической энергии. Изменение частоты переменного тока в судовой электроэнергетической системе приводит к изменению режимов работы ряда электротехнических систем, в частности, к уменьшению производительности насосов и вентиляторов, к нарушению устойчивости работы генераторов и турбин электрической станции и к снижению перегрузочной способности асинхронных электродвигателей. Большое влияние изменение частоты вносит в регулирование моментов подачи на полупроводниковые вентили импульсов управления, формируемые фазосмещающими устройствами в составе системы управления выпрямителя. В результате этого происходит ухудшение показателей качества процесса регулирования и изменение статических и динамических характеристик, а также появляется возможность возникновения опасных ситуаций для технологического оборудования. Для стабилизации выходных параметров полупроводникового преобразователя разработано цифровое фазосмещающее устройство с блоком памяти, позволяющее корректировать моменты коммутации полупроводникового вентиля в зависимости от частоты переменного тока. Целью данной работы является анализ функционирования фазосмещающих устройств различных типов на основе статических и динамических характеристик относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения в зависимости от частоты напряжения и угла управления. Для исследования предлагаемого устройства выполнен ряд опытов на основе имитационной модели в среде MatLab. Представлена обработка результатов, полученных в ходе исследования имитационной модели, предложенного цифрового фазосмещающего устройства в составе трехфазного выпрямителя с несимметричным управлением совместно с устройством-прототипом. Результаты анализа показали возможность применения разработанного устройства с устойчивостью к нестабильности изменения частоты питающей сети в составе трехфазного выпрямителя с целью уменьшения отклонения выпрямленного напряжения и плавного изменения угла управления для питания потребителей постоянного тока в судовых системах электрооборудования. Технический эффект разработанного устройства заключается в повышении разрешающей способности по времени в отличие от устройства-прототипа.

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

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

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

IMITATION MODEL OF A DIGITAL PHASE-SHIFTING DEVICE WITH INCREASED TIME RESOLVING CAPABILITY

The functioning of shipboard electrical equipment is closely related with the quality of electrical energy. Changing the frequency of the alternating current leads to a change in the operating modes of electrical systems in the ship electric power system. In particular, to a decrease in the performance of pumps and fans, to an interruption of the stability of the generators and turbines of the electricity power station and to a decrease in the overload capacity of induction motors. The influence of the frequency change introduces in the regulation of the moments commutation to the semiconductor valves. Pulses of control formed by phase-shifting devices of the rectifier control system. As a result, there is a deterioration in the quality of the regulatory process and a change in static and dynamic characteristics, as well as the possibility of dangerous situations for process equipment. The digital phase-shifting device with a memory unit was developed for stabilize the output parameters of the semiconductor converter. This device allows to correct the commutating moments of the semiconductor gate depending on the frequency of the alternating current. The purpose of this work is to analyze the functioning of various types of phase-shifting devices based on the static and dynamic characteristics of the relative error of average rectified voltage depending on the voltage frequency and the angle of control. To study the proposed device, a series of experiments was carried out on the basis of a simulation model in the MatLab environment. The processing of the results obtained during the study of the simulation model proposed by the digital phase-shifting device as part of a three-phase rectifier with asymmetric control together with the prototype device is presented. The results of the analysis showed the possibility of using the device with resistance to instability of changes in the frequency of the supply network as part of a three-phase rectifier in order to reduce the deviation of the rectified voltage and smoothly change the angle of control for powering DC consumers in ship power systems. The technical result of the developed device is to increase the time resolution in contrast to the device prototype.

Keywords: phase shifting device, frequency instability, control systems, semiconductor converter, simulation model.

Введение. Качество электроэнергии имеет важное значение в режимах работы электрооборудования. Ухудшение качества электроэнергии из-за кратковременных (провалы, скачки напряжения и т.д.) и длительных (гармонические искажения, несимметрия напряжения, отклонение частоты и напряжения от номинальных значений и т.д.) возмущений приводит к изменению работы систем управления, к возникновению резонансных явлений и сокращению срока службы электрических машин, к неисправностям пускозащитной аппаратуры и другим негативным последствиям [1–10].

Изменение скорости вращения приводного двигателя, сбои в работе систем регулирования частоты вращения, подключение и отключение нагрузки соизмеримой мощности и другие нарушения баланса между генерируемой и потребляемой мощностью приводят к отклонению амплитуды и частоты напряжения от номинальных параметров

[1, 4, 10]. Такие нарушения в работе систем электроснабжения оказывают большое влияние на функционирование систем управления полупроводниковых преобразователей, которые синхронизируются с сетевым напряжением.

Для обеспечения нормального режима работы управляемых выпрямителей необходимо производить открытие полупроводниковых вентилялей в определенные моменты времени. При этом управляющие сигналы, выработанные системой управления преобразователя, представляют собой сигнал постоянной формы или импульсы различной амплитуды или длительности [11]. Изменение фазы управляющего сигнала относительно определенной точки синусоидального напряжения приводит к изменению момента открытия вентиля, и тем самым происходит регулирование выходных параметров преобразователя [12]. Преобразование управляющего сигнала в угол управления α , отсчитываемый от момента естественной коммутации или от момента подачи предыдущего импульса, и распределение коммутирующих импульсов по управляющим электродам происходят в фазосмещающем устройстве (ФСУ), которое является основным узлом системы управления [11–14].

В судовых электроэнергетических системах, в которых происходят периодические изменения генерируемой и потребляемой электроэнергии, предельное отклонение частоты не должно превышать $\pm 2\%$ в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 10\%$ в течение 100 % времени интервала в одну неделю [4, 10, 15–17]. В таких системах применяемые ФСУ обладают такими недостатками, как невозможность плавного изменения угла управления и погрешность задания угла управления при нестабильности частоты питающего напряжения [18].

Для устранения данного недостатка было разработано цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения и заданного угла управления [19]. Однако недостатком вышеописанного ЦФСУ является невысокая разрешающая способность по времени, равная периоду питающей сети, что приводит к снижению точности регулирования угла управления. Для устранения данного недостатка была разработана имитационная модель ЦФСУ. Устройство, выполненное на основе предложенной модели, позволяет сократить время коррекции угла управления, за счет добавления второго суммирующего счетчика, RS-триггера и логического элемента ИЛИ, обеспечивающих измерение длительности положительного полупериода

и поочередную запись кодов длительности положительного и отрицательного полупериода питающего напряжения сети. Данная структура позволяет улучшить динамические характеристики ЦФСУ и повысить точность регулирования угла управления.

1. Методы и материалы. Блок-схема имитационной модели на основе трехфазного мостового выпрямителя (рис. 1) состоит из блоков источника трехфазного напряжения ИН1 и ИН2 и блоков синхронизации УС1 и УС2, блоки ПП1 и ПП2 представляют собой трехфазную мостовую схему выпрямления с несимметричным управлением.

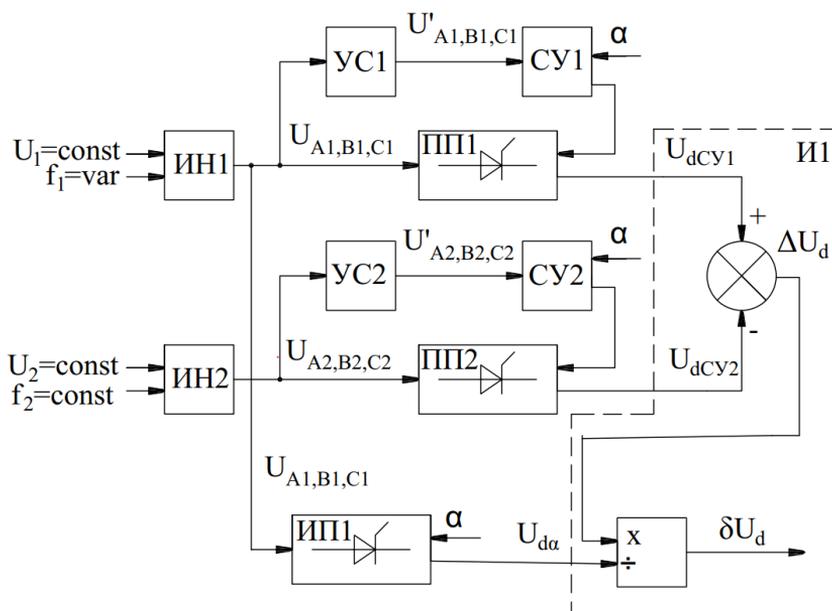


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели для исследования относительного среднего выпрямленного напряжения при использовании ЦФСУ с повышенным разрешением по времени и ЦФСУ-прототипа

Значение угла управления α поступает на вход блоков СУ1, СУ2 и идеального выпрямителя ИП1, а задание частоты f_1 и f_2 и амплитуды U_1 и U_2 трехфазного напряжения осуществляется в блоках источников напряжения ИН1 и ИН2. Блок ИП1 представляет собой трехфазный неуправляемый выпрямитель, на выходе которого формируется среднее значение выпрямленного напряжения в соответствии с его регулировочной характеристикой. Блок измерителя И1 формирует относительное отклонение среднего выпрямленного напряжения при изменении частоты напряжения сети [18].

Имитационная модель одного канала системы управления с ЦФСУ с повышенной разрешающей способностью по времени в составе блока СУ1 и СУ2 представлена на рис. 2.

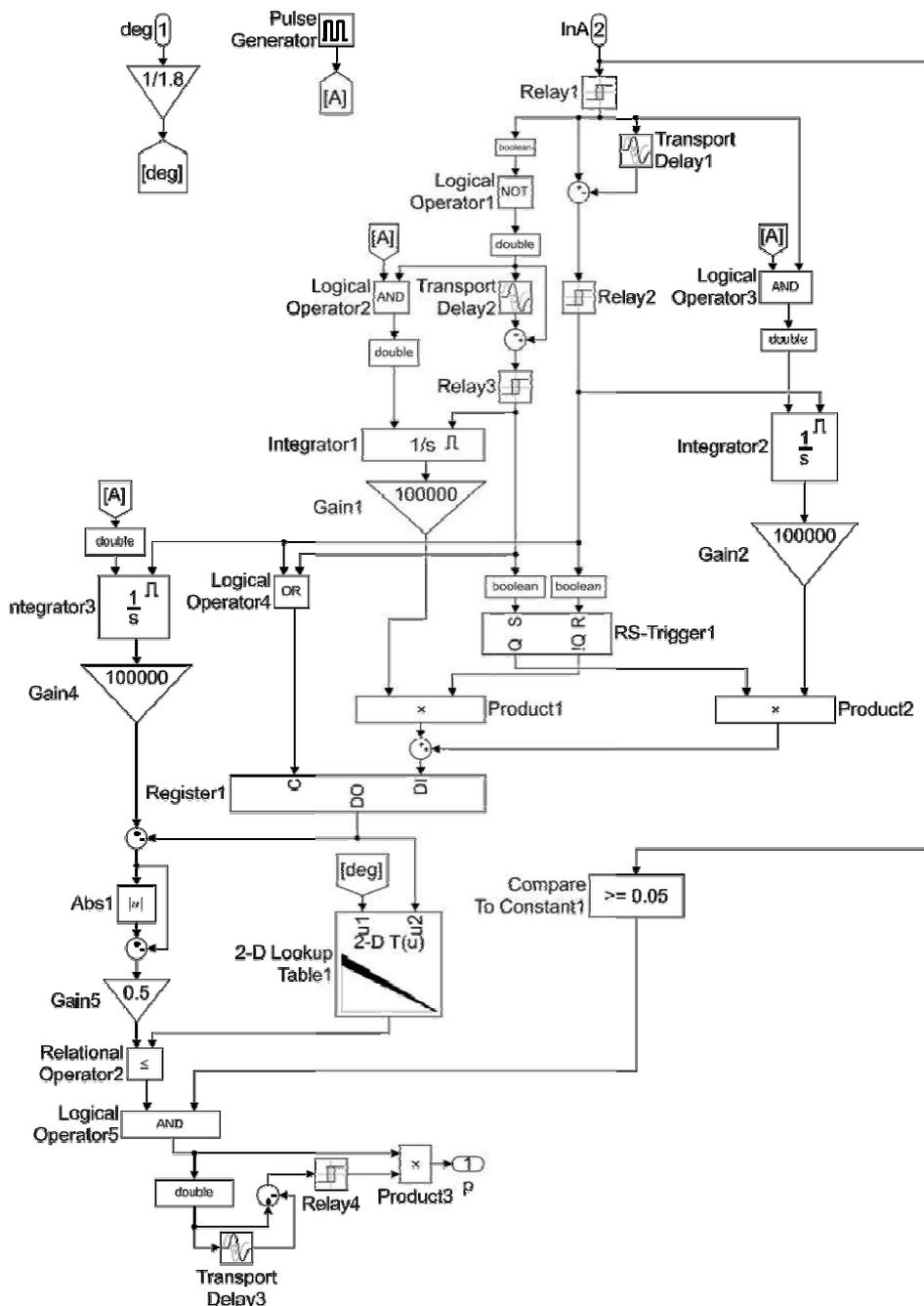


Рис. 2. Структурная схема ЦФСУ с повышенным разрешением по времени

Напряжение синусоидальной формы поступает с выхода блока УС1 на вход формирователя прямоугольных импульсов, представленный блоком Relay1. Прямоугольный импульс с выхода Relay1 поступает на второй вход логических элементов «И» Logical Operator3 и Logical Operator2 (через логический элемент «НЕ» Logical Operator1), на первые входы которых приходят импульсы стабильной частоты с элемента Pulse Generator1.

Во время положительной полуволны напряжения вычитающий счетчик (Intergtator3, Gain 4, Sum4, Abs1, Sum5, Gain5) формирует линейный опорный код $K_{оп}$. Формирование фазы импульса коммутации обеспечивает элемент Relational Operator2, который генерирует прямоугольной формы сигнал при соблюдении неравенства двух значений сигналов: спадающего сигнала с выхода вычитающего счетчика и сигнала с выхода блока памяти. Далее этот сигнал поступает на выходной формирователь импульсов (Transport Delay3, Sum6, Relay4, Product3), который по фронту входного сигнала формирует импульс (длительность импульса задается в элементе Transport Delay3), который поступает на управляющий электрод вентиля трехфазного мостового выпрямителя. Первый и второй формирователи коротких импульсов работают аналогично выходному формирователю, однако их выходные сигналы служат для сброса значения суммирующих сигналов на выходе вычитающих и суммирующих счетчиков.

Формирование сигнала, пропорционального половине периода напряжения синхронизирующего напряжения, обеспечивают суммирующие счетчики, состоящие из элементов Integrator1, Integrator2, Gain1, Gain2. Итоговое значение сигнала с выхода суммирующих счетчиков поступает через регистр памяти Register1 и элементы Product1, Product2, Sum3 на вход блока памяти 2-D Lookup Table1, в который записывается код (рис. 3) в зависимости от необходимого угла управления α и текущего кода $K_{оп}$ в функции от частоты напряжения сети.

Обновление корректирующего кода обеспечивают элементы Product1, Product2, Sum3 и их связи и RS-Trigger1. Формирование сигналов с выхода счетчика отрицательной полуволны напряжения обеспечивается при подаче прямоугольного импульса на вход «S» элемента RS-Trigger1, а отрицательного – на вход «R».

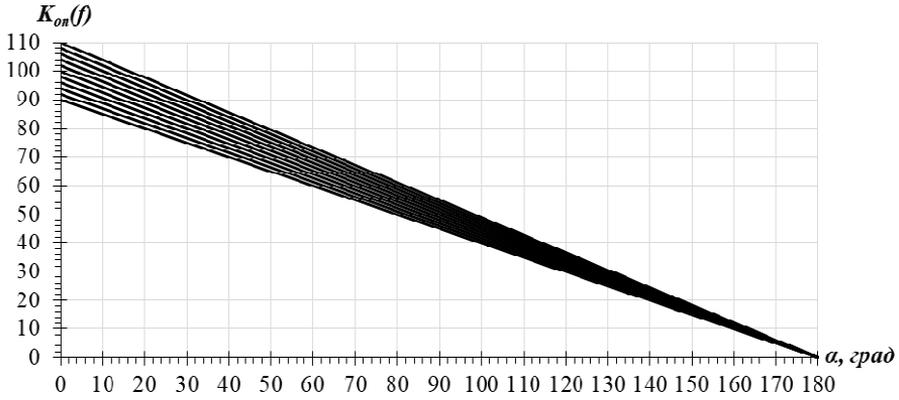
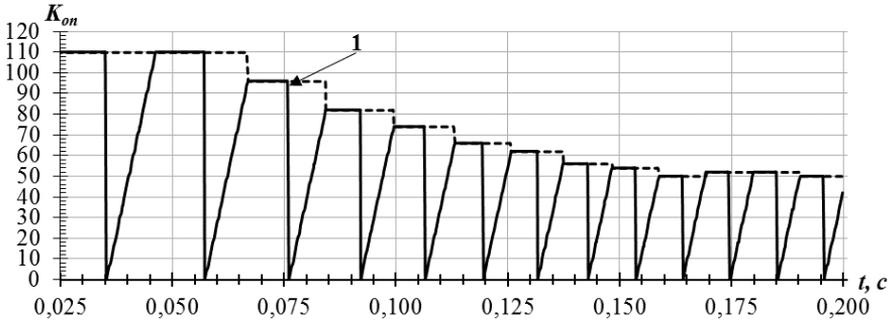
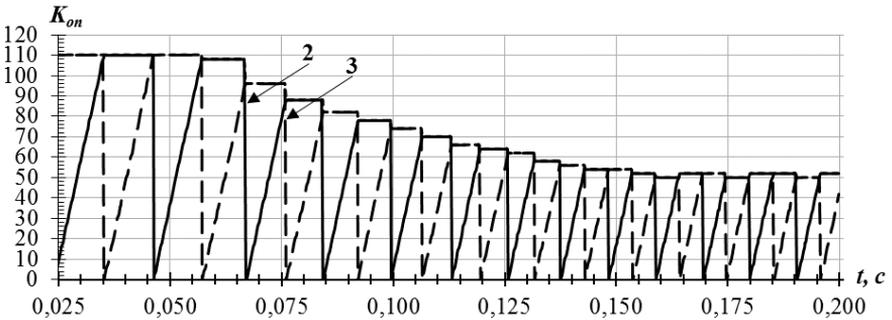


Рис. 3. Область эталонного кода в блоке памяти цифрового фазосмещающего устройства

2. Результаты исследования. Формирование линейно-возрастающего опорного кода $K_{оп}$ для ЦФСУ-прототипа и ЦФСУ с повышенным разрешением по времени проиллюстрировано на рис. 4.



a



б

Рис. 4. Формирование опорного кода ЦФСУ-прототипа (*a*) и ЦФСУ с повышенным разрешением по времени (*б*)

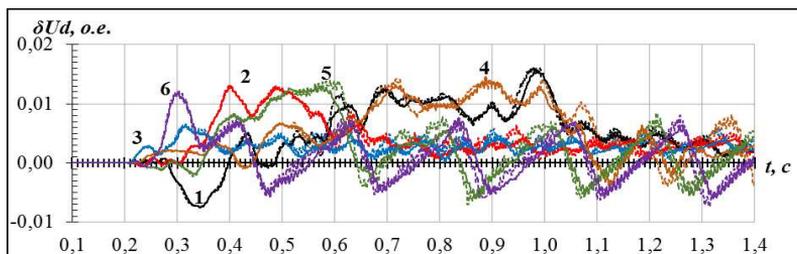
Опорный код $K_{\text{оп}}$ приведен в виде весового кода. Частота напряжения линейно изменялась от 45 Гц, что соответствовало опорному коду 110, до 80 Гц ($K_{\text{оп}}$ равен 50). При использовании двух типов ЦФСУ с изменением частоты напряжения наклон опорного кода $K_{\text{оп}}$ остается постоянным и зависит от частоты следования импульсов опорного генератора, а изменяется только максимальное значение $K_{\text{оп}}$, которое соответствует половине периода питающего напряжения. Формирование кода завершается в момент перехода напряжения синусоидальной формы через нулевое значение.

При использовании ЦФСУ-прототипа обновление опорного кода $K_{\text{оп}}$ происходит за период синусоидального напряжения в соответствии с характеристикой 1 (рис. 4, а). В ЦФСУ с повышенным разрешением по времени (рис. 4, б) за счет использования двух счетчиков код $K_{\text{оп}}$ обновляется каждый полупериод напряжения (характеристика 2 и 3). Таким образом, использование двух линейно-возрастающих функций, одна из которых формируется при отрицательном полупериоде, а вторая – при положительном, позволяет сократить период обновления кода $K_{\text{оп}}$, что приводит к более плавному регулированию моментов формирования импульсов управления при изменении частоты напряжения и угла управления.

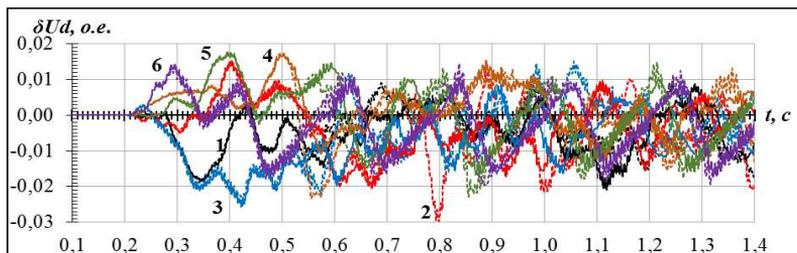
Анализ динамических и статических свойств представленных типов ЦФСУ проведен с использованием зависимостей относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения δU_d от угла управления α и частоты источника напряжения ИН1 f_1 . Величина потребляемой мощности активных нагрузок для блоков выпрямителей ПП1, ПП2 и ИП1 равна 4 кВт. Выходное напряжение источников напряжения ИН1 и ИН2 принималась 400 В, а частота напряжения источника ИН2 соответствовала 50 Гц.

Исследование проводилось для следующих случаев:

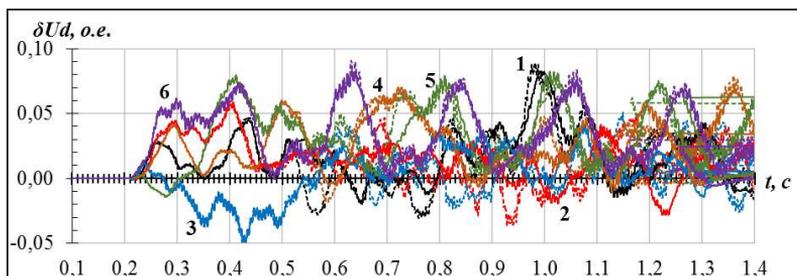
- 1) при изменении частоты напряжения f_1 и фиксированном угле управления α , равном 30° (рис. 5, а);
- 2) при изменении частоты напряжения f_1 и фиксированном угле управления α , равном 60° (рис. 5, б);
- 3) при изменении частоты напряжения f_1 и фиксированном угле управления α , равном 120° (рис. 5, в);
- 4) при изменении угла управления α в диапазоне от 0 до 180° и фиксированной частоте напряжения от 45 до 55 Гц (рис. 6).



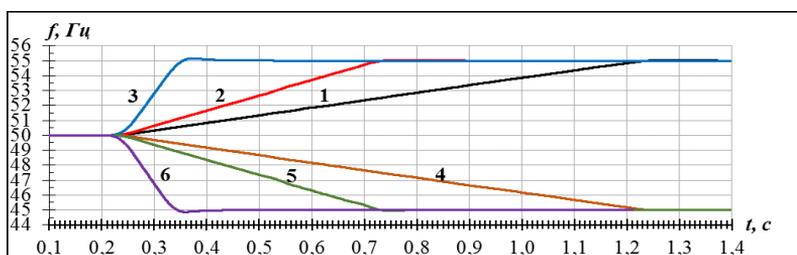
a



б



в



г

Рис. 5. Динамические характеристики при использовании различных типов ЦФСУ: *a* – зависимость $\delta U_d(t)$ при угле управления 30° ; *б* – зависимость $\delta U_d(t)$ при угле управления 60° ; *в* – зависимость $\delta U_d(t)$ при угле управления 120° ; *г* – зависимость частоты напряжения f_1 от времени t

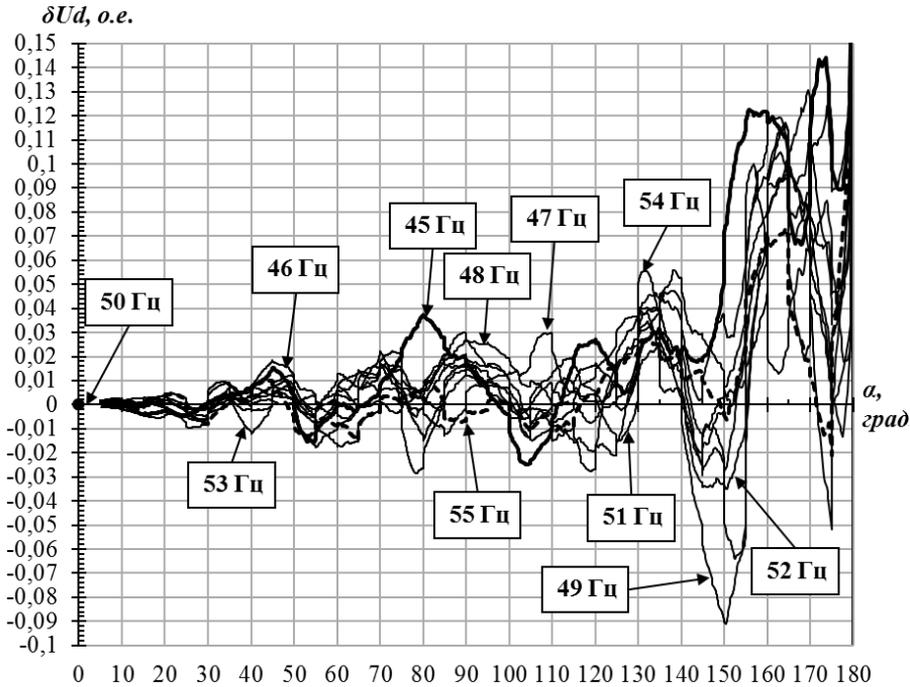


Рис. 6. Зависимость δU_d от угла управления α при использовании ЦФСУ с повышенным разрешением по времени

Анализ полученных результатов в ходе исследования позволяет сделать вывод, что благодаря использованию в системе управления выпрямителя ЦФСУ с повышенным разрешением по времени (сплошная линия) возможно уменьшить максимальное значение относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения по сравнению с ЦФСУ-прототипом (пунктирная линия) при различном задании угла управления α и изменении частоты напряжения f_1 (характеристики 1–6, см. рис. 5). При этом с увеличением значения угла управления α происходит характерное увеличение значения δU_d для исследуемых моделей ЦФСУ.

Скорость изменения частоты напряжения f_1 практически не влияет на амплитуду δU_d . При значениях угла управления, равных 30° , 60° и 120° , максимальные значения δU_d наблюдаются на характеристиках 1, 2 и 6 и равны 0,017, $-0,03$ и 0,09 соответственно.

В установившемся режиме максимальные значения δU_d наблюдаются при уменьшении частоты напряжения (характеристики 4–6) и колеблются в пределах значений от $-0,008$ до 0,008 для $\alpha = 30^\circ$, от $-0,022$ до 0,014 для $\alpha = 60^\circ$ и от $-0,01$ до 0,075 для $\alpha = 120^\circ$.

Из характеристик (см. рис. 6) следует, что в диапазоне угла управления $0-140^\circ$ величина δU_d изменяется от $-0,03$ до $0,054$. При этом значении α меньше 145° , величина δU_d не превышает значения по модулю $0,056$, при дальнейшем увеличении угла управления наблюдается увеличение значения δU_d до $0,15$. Наибольшие значения δU_d находятся при частоте напряжения, равной 45 и 49 Гц, а каждая характеристика носит знакопеременный характер.

В работе [18] при использовании дискретного фазосмещающего устройства без коррекции угла управления δU_d превышает $0,5$ по модулю, при использовании ЦФСУ-прототипа δU_d находится в пределах от $-0,052$ до $0,053$. Предложенное ЦФСУ за счет увеличения разрешающей способности в два раза позволяет уменьшить относительное отклонение среднего выпрямленного напряжения по сравнению с ЦФСУ-прототипом. Таким образом, данное устройство целесообразно применять в автономных системах электроснабжения с целью стабилизации выходных параметров преобразователя с нестабильной частотой сети.

Выводы. Результаты моделирования показывают, что система управления с ЦФСУ с повышенным разрешением по времени обеспечивает высокую стабильность заданного угла управления в зависимости от частоты питающего напряжения. Вид характеристик относительного среднего выпрямленного напряжения определяется структурой полупроводникового преобразователя и системы управления в целом. Так, при использовании трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением статические и динамические характеристики предложенного ЦФСУ практически совпадают по форме, но имеют меньшие значения отклонения по сравнению с ЦФСУ-прототипом.

Результаты исследования учтены при разработке цифрового фазосмещающего устройства с повышенной разрешающей способностью по времени [20].

Библиографический список

1. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. – Second edition. – Academic Press, 2015. – 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9
2. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – М: Издат. дом МЭИ, 2006. – С. 23–111.

3. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.

4. Barros J., Diego R.I. A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. – 2016. – Vol. 62(C). – P. 665–672. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.043

5. New distortion and unbalance indices based on power quality analyzer measurements / P. Salmeron, R.S. Herrera, A.P. Valles, J. Prieto // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2009. – Vol. 24. – P. 501–507. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013378

6. Huang J., Jiang Z. Power Quality Assessment of Different Load Categories // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 141. – P. 345–351. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.041

7. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Second edition. – Wiley, New York, 2017. – 464 p.

8. Ольховский В.Я., Мятёж Т.В., Наяксов С.Ю. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1(30). – С. 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97

9. Экспериментальное исследование несимметрии трехфазной системы напряжений / З.Э. Абдиева, Б.И. Сариев, Р.Б. Куржумбаева, Х.Т. Касмамбетов // *Научно-технический вестник Брянск. гос. ун-та*. – 2018. – № 2. – С. 93–100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225

10. Mindykowski J., Szweda M., Tarasiuk T. Voltage and frequency deviations in exemplary ship's network – research for ship owner // *EPQU Magazine*. – 2008. – Vol. 1(2). – P. 61–67.

11. Горбачев, Г.Н., Чаплыгин Е. Промышленная электроника: учебник для вузов / под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 279–295.

12. Штрумпф Э.П. Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: учебник. – СПб.: Судостроение, 1993. – С. 319–335.

13. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 220–253.

14. Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователями. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 56–68.

15. Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Ч. XI. Электрическое оборудование. – СПб.: Рос. морской регистр судоходства, 2018. – 131 с.

16. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.

17. Правила Российского речного регистра: в 5 т. Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). – М.: Рос. речной регистр, 2017. – 1885 с.

18. Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения // Вестник гос. ун-та морск. и реч. флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – № 4(44). – С. 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

19. Пат. 2612055 Рос. Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2015155112; заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017. Бюл. № 7.

20. Пат. 2658598 Рос. Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2017122675; заявл. 27.06.2017; опубл. 21.06.2018. Бюл. № 18.

References

1. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. 2nd ed. *Academic Press*, 2015. 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9

2. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G. et al. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power Quality Management]. Ed Iu.V. Sharov. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2006, pp. 23-111.

3. Anisimov Ia.F., Vasil'ev E.P. Elektromagnitnaia sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovatelei i sudovykh elektroustanovok [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship electrical installations]. Leningrad: Sudostroenie, 1990. 264 p.

4. Barros J., Diego R.I. A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, 2016, vol. 62(C), pp. 665-672. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.043
5. Salmeron P., Herrera R.S., Valles A.P., Prieto J. New distortion and unbalance indices based on power quality analyzer measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, pp. 501-507. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013378
6. Huang J., Jiang Z. Power Quality Assessment of Different Load Categories. *Energy Procedia*, 2017, vol. 141, pp. 345-351. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.041
7. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. 2nd ed. Wiley, New York, 2017. 464 p.
8. Ol'khovskii V.Ia., Miatezh T.V., Naiaksov S.Iu. Issledovanie vozdeistviia vysshikh garmonik melkikh nelineinykh potrebitelei na rabotu seti do 1000 V [Predictions of Circuit High Harmonics Values Increase in the Networks of up to 1000 V]. *Doklady akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2016, no. 1(30), pp. 84-97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97
9. Abdieva Z.E., Sariev B.I., Kurzhumbaeva R.B., Kasmambetov Kh.T. Eksperimental'noe issledovanie nesimmetrii trekhfaznoi sistemy napriazhenii [Experimental study of the asymmetry of a three-phase stress system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Brianskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 2, pp. 93-100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225
10. Mindykowski J., Szweda M., Tarasiuk T. Voltage and frequency deviations in exemplary ship's network - research for ship owner. *EPQU Magazine*, 2008, vol. 1(2), pp. 61-67.
11. Gorbachev, G.N., Chaplygin E. Promyshlennaia elektronika [Industrial electronics]. Ed. V.A. Labuntsov. Moscow: Energoatomizdat, 1988, pp. 279-295.
12. Shtrumpf E.P. Sudovaia elektronika i silovaia preobrazovatel'naia tekhnika [Ship electronics and power converter equipment]. Saint Petersburg: Sudostroenie, 1993, pp. 319-335.
13. Rozanov Iu.K. Osnovy silovoi elektroniki [Power Electronics Basics]. Moscow: Energoatomizdat, 1992, pp. 220-253.
14. Ivanov A.G., Belov G.A., Sergeev A.G. Sistemy upravleniia poluprovodnikovymi preobrazovateliami [Semiconductor Converter Control Systems]. Cheboksary: Chuvashskii universitet, 2010, pp. 56-68.

15. Pravila klassifikatsii i postroiки morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva. Chast' XI. Elektricheskoe oborudovanie [Rules for the classification and construction of ships of the Russian Maritime Register of Shipping. Part XI. Electrical equipment]. Saint Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018. 131 p.

16. GOST 32144-2013. Elektricheskaiа energiiа. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiа [GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Moscow: Standartinform, 2014. 6 p.

17. Pravila Rossiiskogo rechnogo registra. Tom 2. Pravila klassifikatsii i postroiки sudov (PKPS) [Rules of the Russian River Register. Vol. 2. Rules for the classification and construction of ships (PCPS)]. Moscow: Rossiiskii rechnoi registr, 2017. 1885 p.

18. Sugakov V.G., Varlamov N.S., Malyshev Iu.S. Obosnovanie realizatsii fazosmeshchaiushchego ustroistva s korrektsiei koda v zavisimosti ot chastoty napriazheniia [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*, 2017, no. 4(44), pp. 829-837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

19. Sugakov V.G., Khvatov O.S., Varlamov N.S. MPK G01R 25/00. Tsifrovoe fazosmeshchaiushchee ustroistvo [MPC G01R 25/00. Digital Phase Biasing Device]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2612055 (2017).

20. Sugakov V.G., Khvatov O.S., Varlamov N.S. MPK G01R 25/00. Tsifrovoe fazosmeshchaiushchee ustroistvo [MPC G01R 25/00. Digital Phase Biasing Device]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2658598 (2018).

Сведения об авторах

Сугаков Валерий Геннадьевич (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта» Волжского государственного университета водного транспорта (603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru).

Варламов Никита Сергеевич (Нижний Новгород, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта» Волжского государственного университета водного транспорта (603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: varlamov_nikita@mail.ru).

Малышев Юрий Сергеевич (Нижний Новгород, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта» Волжского государственного университета водного транспорта (603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru).

About the authors

Sugakov Valery Gennadievich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport Volga State University of Water Transport (603951, Nizhnii Novgorod, 5, Nesterova str., e-mail: elektrikasp@mail.ru).

Varlamov Nikita Sergeevich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Graduate Student Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport Volga State University of Water Transport (603951, Nizhnii Novgorod, 5, Nesterova str., e-mail: varlamov_nikita@mail.ru).

Malyshev Yuri Sergeevich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport Volga State University of Water Transport (603951, Nizhnii Novgorod, 5, Nesterova str., e-mail: elektrikasp@mail.ru).

Получено 17.07.2019