

УДК 621.316.722.3

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

ЦИФРОВОЕ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО В ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

Функционирование фазосмещающих устройств, входящих в систему управления полупроводниковыми преобразователями, тесно связано с качеством электрической энергии. Отклонение частоты и амплитуды питающего напряжения от номинального значения вносят изменения в моменты формирования импульсов коммутации, поступающие на вентили выпрямителя. В результате происходит изменение выходных параметров выпрямителя. В данной работе рассмотрено цифровое фазосмещающее устройство с блоком памяти, обеспечивающее высокую стабильность угла управления в условиях изменения частоты питающей сети, в составе системы управления для различных типов трехфазных управляемых выпрямителей. Целью исследования является значение изменения относительного среднего выпрямленного напряжения в зависимости от частоты напряжения сети и угла управления. Исследования проводились с помощью разработанной имитационной модели фазосмещающего устройства в составе управляемого выпрямителя. Представлены результаты моделирования в диапазоне частоты напряжения от 45 до 55 Гц и активного характера нагрузки. Путем сопоставления результатов моделирования установлено, что выходные параметры выпрямителя зависят не только от величины изменения частоты, но и от структуры схемы выпрямителя совместно с системой управления. Показана возможность применения разработанного цифрового фазосмещающего устройства с устойчивостью к нестабильности изменения частоты питающей сети в составе различных типов трехфазных выпрямителей. С его помощью уменьшается отклонение среднего значения выпрямленного напряжения для питания потребителей постоянного тока в судовых системах электроснабжения, характеризующихся периодическими отклонениями частоты напряжения вследствие изменения генерируемой и потребляемой мощности.

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

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые преобразователи нашли широкое применение в судовых системах электроснабжения. В зависимости от назначения полупроводниковые преобразователи можно разделить на три основные группы: общего назначения, электроснабжения и электропривод механизмов [1]. Для питания мощных потребителей электриче-

ской энергии постоянного тока используются полупроводниковые преобразователи на основе трехфазных выпрямителей, характеризующие высоким значением выпрямленного напряжения и относительно малой его пульсацией [2]. Для регулирования выпрямленного напряжения используется фазосмещающее устройство (ФСУ), которое является основным элементом системы управления и определяет моменты формирования импульсов коммутации [3-6].

Отклонение частоты напряжения в системах электроснабжения водного транспорта негативно влияет на функционирование ФСУ. В результате происходит изменение параметров с выхода полупроводникового преобразователя, в частности, увеличение относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения δU_d . В связи с этим разработано цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) с использованием блока памяти, корректирующего управляющий код в зависимости от частоты напряжения [7].

II. Методы и материалы

Для определения эффективности выпрямителя с ЦФСУ в составе системы управления проведено исследование имитационной модели, в результате которого модель показала низкое значение δU_d при изменении частоты напряжения [8]. Однако в данной работе проведен анализ на основе мостовой трехфазной схемы выпрямителя с несимметричным управлением. Целью настоящего исследования является анализ свойств ЦФСУ в составе различных схем трехфазных выпрямителей.

Диапазон исследуемых частот принимался в соответствии с [9-11] и составлял 45-55 Гц, а диапазон угла управления α выбирался в соответствии со схемой трехфазного выпрямителя. Имитационная модель (рис. 1) разработана в программном пакете MATLAB Simulink и состоит из двух программируемых источников трехфазного напряжения (Three-Phase Programmable Voltage Source 1 и Three-Phase Programmable Voltage Source 2), активных нагрузок Series RLC Load 1-Series RLC Load 3, мощность которых принималась 4 кВт, блоков синхронизации UC1 и UC2, блока измерения величины δU_d И1, блока системы управления с ЦФСУ СУ1 и СУ2. Описание системы управления с ЦФСУ и работы имитационной модели более подробно описано в работе [8].

Подсистемы силовой части трехфазных выпрямителей ПП1 и ПП2 показаны на рис. 2. В качестве блоков ПП1 и ПП2 используются подсистемы на основе трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением (рис. 2, а), трехфазной нулевой схемы (рис. 2, б), трехфазной мостовой схемы (рис. 2, в, г). В данные подсистемы входят группы тиристоров Thyristor-1-Thyristor-6 и диодов Diode-2-Diode 4, а также вольтметр Voltage Measurement-1 и обратный диод Diode-1.

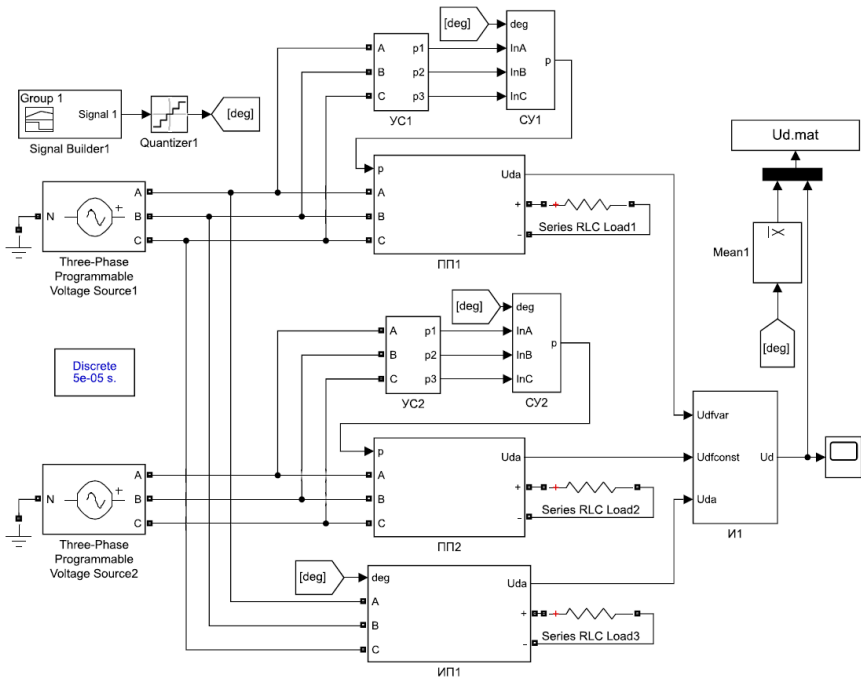


Рис. 1. Имитационная модель для исследования относительного среднего выпрямленного напряжения с различными типами трехфазных управляемых выпрямителей

Идеальный преобразователь ИП1 формирует на выходе напряжение U_d в зависимости от угла управления α и входного напряжения U в соответствии с регулировочной характеристикой, выраженная формулами [12]:

1) для трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \alpha); \quad (1)$$

2.1) для трехфазной нулевой схемы в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

2.2) для трехфазной нулевой схемы в диапазоне угла управления $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\alpha + 30^\circ)}{\sqrt{3}} \right); \quad (3)$$

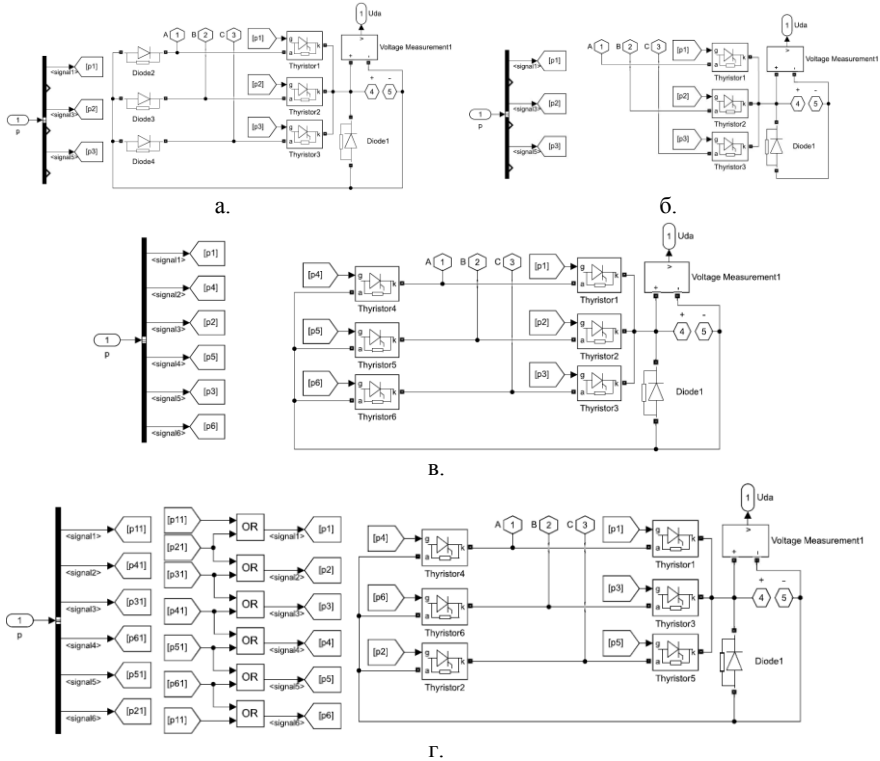


Рис. 2. Подсистема полупроводникового преобразователя:
 а) трехфазная мостовая схема с несимметричным управлением;
 б) трехфазная нулевая схема; в) трехфазная мостовая схема;
 г) трехфазная мостовая схема с подачей дублирующего импульса

3.1) для трехфазной мостовой схемы в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{\pi} \cdot \cos \alpha; \quad (4)$$

3.2) для трехфазной мостовой схемы в диапазоне угла управления $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \left(1 + \frac{\cos \alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \alpha \right). \quad (5)$$

III. Результаты исследования

На основе данных результатов моделирования построены графические зависимости δU_d от угла управления α при частоте напряжения в диапазоне от 45 до 55 Гц.

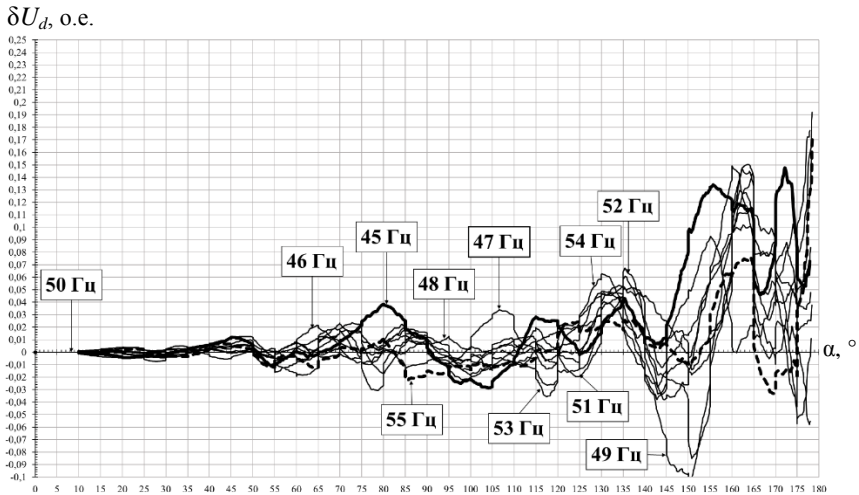


Рис. 3. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением

На рис. 3 представлена зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании в качестве силового блока трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением. В диапазоне угла управления от 0 до 120° величина δU_d изменяется в интервале от $-0,035$ до $0,04$ на исследуемой частоте напряжения. Максимумы значения δU_d зафиксированы при частоте напряжения равной 45 и 53 Гц в диапазоне угла управления $75-85^\circ$ и $115-120^\circ$ соответственно. При дальнейшем увеличении α до 175° наблюдается увеличение

значения δU_d до 0,15, при этом все характеристики имеют знакопеременный характер на всем протяжении изменения угла управления α .

δU_d , о.е.

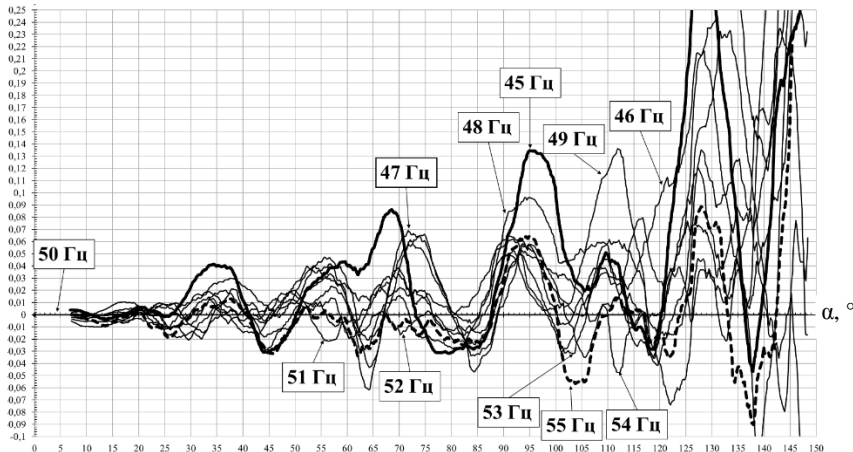
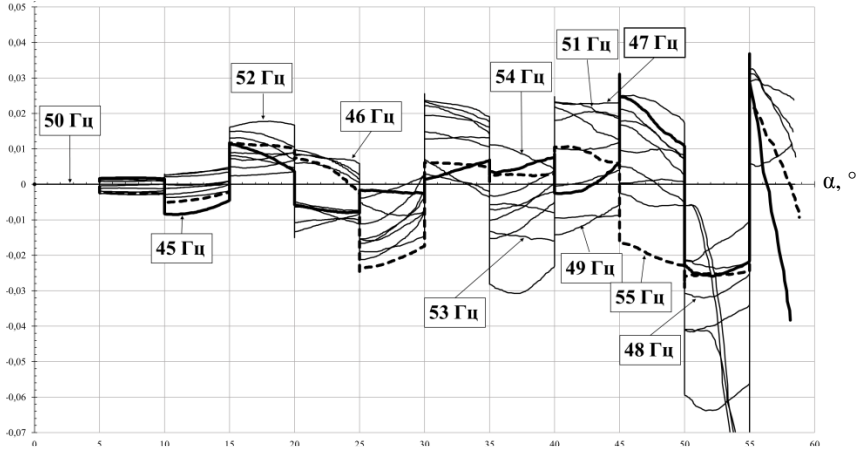
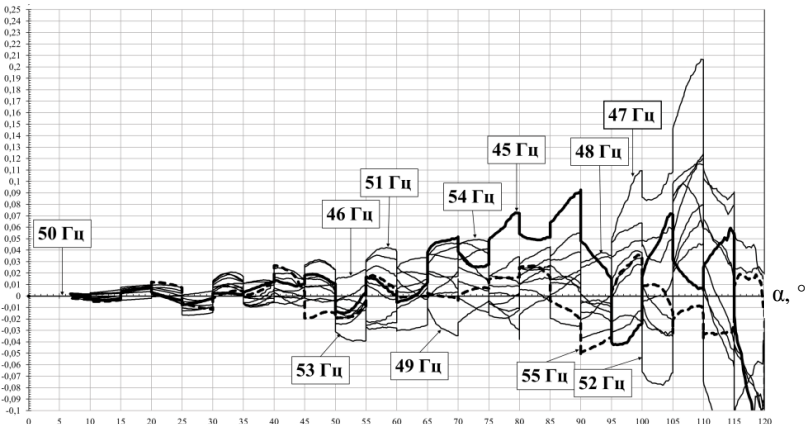


Рис. 4. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной нулевой схемы

В случае использования трехфазной нулевой схемы выпрямителя (рис. 4) наблюдается увеличение δU_d в отличие от мостовой схемы с несимметричным управлением. В диапазоне угла управления α от 0° до 120° максимальные значения δU_d зафиксированы при частоте напряжения 45 и 55 Гц и равны 0,133 и -0,055 соответственно. Дальнейшее увеличение угла управления сопровождается резким увеличением значения δU_d . Наблюдаются пересечения характеристик через ноль и их знакопеременный характер.

При использовании трехфазной мостовой схемы максимальный диапазон регулирования открытия тиристорov составлял примерно 57° (рис. 5). Дальнейшее увеличение угла управления приводит к резкому увеличению значения δU_d , за счет снижения среднего выпрямленного напряжения. Однако на интервале $0^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ значение δU_d не превышает 0,062. Так же, как и в предыдущих измерениях, характеристики δU_d имеют знакопеременный характер и пересекают ось абсцисс.

δU_d , о.е.Рис. 5. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы δU_d , о.е.Рис. 6. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы с дублирующими импульсами коммутации

При формировании в трехфазных мостовых схемах дублирующих импульсов коммутации (рис. 6) максимальный диапазон регулирования составил порядка 120° . Как и в других случаях, зависимость $\delta U_d(\alpha)$ носит знакопеременный характер на исследуемых частотах питающего напряжения. В этом случае кривые $\delta U_d(\alpha)$ по характеру различаются от зависимостей при использовании одиночных импульсов. Значения δU_d в диапазоне

$0^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ находятся в пределах от $-0,04$ до $0,04$, приблизительно в этих же пределах находится значения δU_d до угла управления равным 65° . Дальнейшее увеличение α так же приводит к возрастанию значения δU_d .

IV. Заключение

На основе данной имитационной модели установлено, что величина относительного среднего выпрямленного напряжения зависит от структуры силовой части полупроводникового преобразователя. Наибольшее значение δU_d наблюдалось при использовании трехфазной нулевой схемы, а наименьшее значение δU_d – при трехфазной мостовой схеме с несимметричным управлением. При этом, вне зависимости от схемы выпрямления характеристики, значения δU_d от частоты питающего напряжения имеют знакопеременный характер, который определяется структурой системы управления.

© Сугаков В.Г., 2019

© Варламов Н.С., 2019

© Малышев Ю.С., 2019

Библиографический список

- [1] Сугаков В.Г., Варламов Н.С. Цифровое фазосмещающее устройство и его области применения на объектах водного транспорта // Актуальные проблемы электроэнергетики. 2017. С. 99-103.
- [2] Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
- [3] Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
- [4] Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователям. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С. 56-68.
- [5] Лихошерст В.И. Системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии: Учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ, 1998. С. 25-33.
- [6] Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. М: Энергоатомиздат, 1992. С. 220-253.
- [7] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Варламов Н.С. Цифровое фазосмещающее устройство, Пат. 2612055 РФ, заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017. – Бюл. № 7.
- [8] Сугаков В.Г. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. № 9 (4). С. 829-837.
- [9] Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. М.: Российский речной регистр, 2017. Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). – 1885 с.

- [10] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.
- [11] Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть XI. Электрическое оборудование. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 131 с.
- [12] Домеников В.И. Стабилизированные источники электропитания судовых радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Судостроение, 1971. – 400 с.

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

DIGITAL PHASE SHIFTING DEVICE AS A COMPONENT OF THREE-PHASE RECTIFIERS

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The operation of phase-shifting devices included in the control system of semiconductor converters related to the quality of electrical energy. The deviation of the frequency and amplitude of the supply voltage from the nominal value introduces changes in the moments of formation of the commutation pulses of rectifier. As a result, the output parameters of the rectifier changes. This article considers a digital phase-shifting device with a memory block. This block provides a high stability of the control angle in the conditions of varying the frequency of the supply voltage and enters in part of a control system for various types of three-phase controlled rectifiers. The purpose of the research is to determine the value of the change of the relative average rectified voltage, depending on the frequency of the mains voltage and the control angle. The research has been carried out using the developed simulation model of a phase shifting device as part of a controlled rectifier. The results of modeling in the frequency range of the voltage from 45 to 55 Hz and the active load characteristic are presented. Analysis of simulation results established that the output parameters of the rectifier depend on the frequency change and the structure of the rectifier circuit with the control system. The results of the research showed the possibility of using the developed digital phase-shifting device with resistance to instability of changes in the frequency of the power supply network. The device is reducing the deviation of the average value of the rectified voltage to supply direct current consumers in the ship power supply systems, which characterized by periodic deviations of the frequency of the voltage due to changes in the generated and consumed power.

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

References

- [1] V.G. Sugakov and N.S. Varlamov, «Cifrovoye fazosmeshchayushchee ustrojstvo i ego oblasti primeneniya na ob'ektah vodnogo transporta», in proc. *Aktual'nye problem elektroenergetiki*. Nizhniy Novgorod: NNSTU, pp. 99-103, 2017 (in Russian).
- [2] Ya.F. Anisimov and E.P. Vasil'ev, *Ehlektronnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh ehlektroustanovok*. St. Petersburg: Sudostroenie, 1990 (in Russian).
- [3] G.N. Gorbachev and E.E. Chaplygin, *Promyshlennaya ehlektronika*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [4] A.G. Ivanov, G.A. Belov and A.G. Sergeev, *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami*. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2010 (in Russian).
- [5] V.I. Lihosherst, *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami ehlektricheskoy ehnergii*. Ekaterinburg: UGTU, 1998 (in Russian).
- [6] Yu.K. Rozanov, *Osnovy silovoy ehlektroniki*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [7] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov and N.S. Varlamov, «*Tsifrovoye fazosmeshchayushcheye ustrojstvo*», R.F. Patent 2612055, March 2, 2017 (in Russian).
- [8] V.G. Sugakov, N.S. Varlamov and Yu.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*, vol. 9, no. 4, pp. 829-837, 2017 (in Russian).
- [9] *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra, vol. 2*. Moscow: Rossiiskii rechnoi registr, 2017 (in Russian).
- [10] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [11] *Pravila klassifikatsii postroiki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva. Chast' XI. Elektricheskoe oborudovanie*. St. Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018 (in Russian).
- [12] V.I. Domenikov and L.M. Kazanskiy, *Stabilizirovannyye istochniki ehlektropitaniya sudovoj radioehlektronnoj apparatury*. St. Petersburg: Sudostroenie, 1971 (in Russian).