

УДК 621.316.72

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. МалышевВолжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ БЕСТРАНСФОРМАТОРНОГО НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Качество электрической энергии в электроэнергетической системе объектов водного транспорта непосредственно связано с режимами эксплуатации судна и типом применяемого генераторного агрегата. Например, в стояночных режимах судна с погрузкой или в режимах маневрирования при включении электродвигателей от судовой электростанции соизмеримой мощности параметры напряжения могут выходить за пределы допустимых значений, что приводит к различным негативным последствиям: уменьшению производительности исполнительных механизмов и систем, появлению сбоев в работе систем управления, сокращению срока службы электрических машин и т.д. В настоящее время помимо разработок устройств, адаптивных к нестабильности параметров напряжения, ведутся изыскания в области энергосберегающих решений. Одним из перспективных решений в этой области является применение в судовой электростанции дизель-генераторов с переменной частотой вращения, которые позволяют уменьшить удельный расход топлива и горюче-смазочных материалов по сравнению с двигателями внутреннего сгорания с постоянной частотой вращения при работе на долевых нагрузках. Однако главной особенностью таких генераторных агрегатов является изменение частоты напряжения на выходных клеммах генератора. Недостатком технических решений на основе использования непосредственных преобразователей частоты является зависимость параметров выходного напряжения от изменения параметров напряжения источника электроэнергии. **Цель исследования:** разработка имитационной модели бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты для анализа её выходных параметров при изменении параметров напряжения источника электроэнергии. **Методы:** для исследования разработанного устройства выполнен ряд опытов на основе имитационной модели в среде MatLab. **Результаты:** разработанное устройство обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети при формировании выходного напряжения с заданными значениями амплитуды и частоты напряжения. Частота выходного напряжения не зависит от частоты напряжения источника электроэнергии. Формирование выходного напряжения обеспечивается в диапазоне от 11 до 100 % амплитуды линейного напряжения источника электроэнергии при коэффициенте нелинейных искажений не более 25 %. **Практическая значимость:** результаты анализа показали возможность применения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты для питания частотно-управляемых электроприводов переменного тока в автономных энергоустановках с переменной частотой вращения привода генератора с целью получения стабильной частоты выходного напряжения.

Ключевые слова: непосредственный преобразователь частоты, судовая электроэнергетическая система, параметры напряжения, моделирование.

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

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

INFLUENCE OF CHANGE A PARAMETERS OF AN ELECTRIC POWER SOURCE ON A OUTPUT VOLTAGE OF THE TRANSFORMER-FREE DIRECT FREQUENCY CONVERTER

The quality of electrical energy related to modes of operation and a type of generator in the electric power system of water transport. For example, voltage parameters can go beyond the permissible values in parking modes of vessel with loading or in maneuvering modes. This leads to various negative consequences: a decrease in the performance of actuators and systems, the appearance of failures in the operation of control systems, and a reduction in a service life of electric machines etc. At present, in addition to a development of devices with adapt to instability of voltage parameters, research carried out of energy-saving solutions. One of a promising solution is the use of variable speed diesel generators in a ship power plant. This can reduce a specific consumption of fuel and lubricants as compared to internal combustion engines with a constant speed, when operating at shared loads. However, the main feature of such generator is the change in a voltage frequency at the output terminals of generator. The disadvantage of direct frequency converters is a dependence of the output voltage parameters on changes of voltage parameters for power source. **Purpose:** creating a simulation model of transformer-free direct frequency converter for analysis of the model output parameters while changing the parameters of power supply voltage. **Methods:** to research the proposed device a number of experiments performed base on a simulation model in the MatLab environment. **Results:** the transformer-free direct frequency converter provides connection of output terminals to the most appropriate voltage of power supply while forming the output voltage with the given values of voltage amplitude and frequency. The frequency of output voltage is independent of frequency voltage of power source. The output voltage provided in the range from 11 to 100 % of amplitude line voltage of the power source with a total harmonic distortion of not more than 25 %. **Practical relevance:** the results of the analysis showed the possibility of using a transformer-free direct frequency converter to power frequency-controlled AC drives in self-contained power plants with a variable speed generator drive in order to obtain a stable output voltage frequency.

Keywords: direct frequency converter, ship electric power system, total harmonic distortion, modeling.

Введение

В настоящее время полупроводниковые преобразователи электрической энергии являются неотъемлемой частью электротехнических комплексов и систем на объектах водного транспорта [1–3].

Работа полупроводниковых преобразователей в судовой электроэнергетической системе (СЭЭС) зависит от режимов эксплуатации судна [4, 5] и от взаимного влияния преобразователей, судовой электростанции и потребителей электроэнергии [6–10]. Степень взаимного влияния в основном определяется типом и соотношением мощностей преобразователей, генераторных агрегатов и других потребителей электрической энергии. Влияние изменения параметров напряжения

источника электроэнергии заключается не только в снижении надежности и эффективности работы, но и в изменении параметров выходного напряжения преобразователя [11–13]. Особенно для серийно выпускаемых устройств, которые разрабатываются для работы при стабильных параметрах электрической энергии.

Помимо этого на данный момент ведутся разработка и внедрение на объекты водного транспорта энергосберегающих решений СЭЭС на основе дизель-генераторов переменной частоты вращения [14–16]. Данные системы позволяют перевести режим работы электростанции в наиболее экономичный по расходу топлива во всем диапазоне изменения нагрузок [17, 18]. Главной особенностью предложенных систем является изменение частоты напряжения на выходных клеммах генератора.

Таким образом, обеспечение требуемого качества электрической энергии [19–21] и эффективной работы полупроводниковых преобразователей электрической энергии при изменении параметров источника электрической энергии было и остается актуальной задачей. Несмотря на разнообразие технических решений, большинство разработанных устройств предназначено для применения в промышленных сетях и не учитывает особенности работы в СЭЭС. Недостатком непосредственных преобразователей частоты (НПЧ) [22], которые разрабатываются для систем с постоянной частотой напряжения, является зависимость параметров выходного напряжения от изменения амплитуды и частоты напряжения источника электроэнергии.

Устранение указанных недостатков возможно путем применения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты (БТНПЧ) [23], который формирует выходное напряжение с заданными параметрами напряжения и обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети вне зависимости от вариации ее параметров (амплитуды, частоты и формы кривой напряжения).

Целью данной работы является анализ параметров выходного напряжения БТНПЧ при изменении параметров источника электроэнергии.

1. Методы и материалы

Источник питания для БТНПЧ имеет трехфазную систему напряжений с выведенной нулевой точкой. Эта система позволяет иметь три прямых фазных напряжения U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} и соответствующие обратные фазные напряжения U_{0A} , U_{0B} , U_{0C} , а также три прямых линей-

ных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и соответствующие обратные линейные напряжения U_{BA} , U_{CB} , U_{AC} . Из этих напряжений можно создать систему двенадцати напряжений, имеющих фазовый сдвиг 30° .

Имитационная модель БТНПЧ представлена на рис. 1.

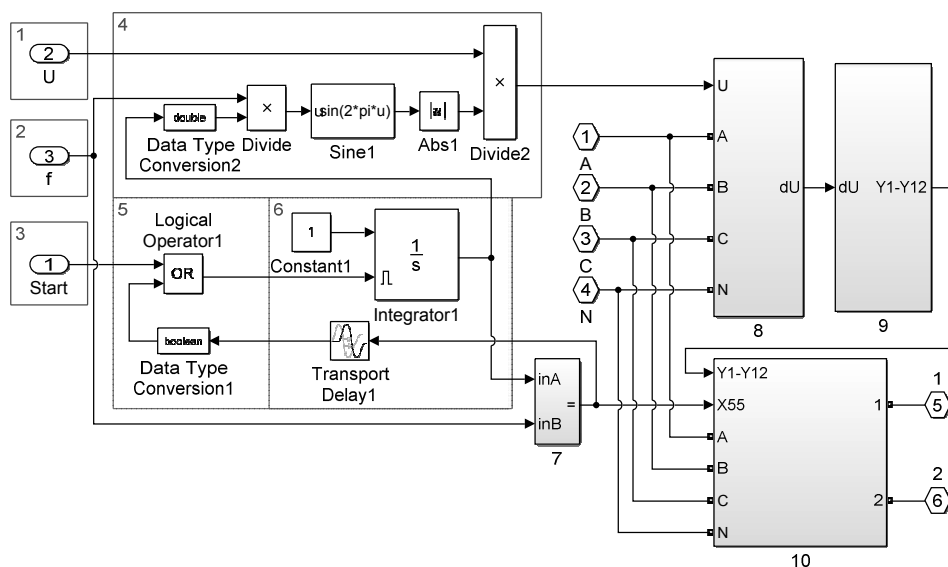


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели БТНПЧ

Элементы 1 (U_3) и 2 (f_3) являются блоками задания амплитуды и частоты эталонного синусоидального напряжения, а элемент 3 (Start) совместно с элементом 5 (Logical Operator1) осуществляет ввод в работу БТНПЧ. Элементы L1, L2, L3 и N являются входными клеммами БТНПЧ, а на клеммах T1 и T2 формируется выходное напряжение.

Формирование эталонной формы выходного напряжения осуществляется с помощью блоков 4 (Divide1, Divide2, Sine1 и Abs1) и 6 (Constant1, Integrator1 и Transport Delay1) совместно с компаратором 7. Компаратор 7 формирует единичный сигнал в моменты, когда текущее время, формируемое блоком 6, превышает значение времени, соответствующее заданной частоте эталонного сигнала.

Формирование выходного напряжения на выходе БТНПЧ осуществляет блок 10 (рис. 2). Блок 11 (Counter1, Transport Delay1, Compare To Constant1 и Compare To Constant2) совместно с RS-триггером 12 (S-R Flip-Flop1) и полупроводниковыми вентилями VT1-VT28 осуществляет формирование положительного и отрицательного полупериода выходного напряжения.

Полупроводниковые вентили, входящие в анодную и катодную подгруппы, осуществляют коммутацию нагрузки в соответствии с работой блоков 8 и 9.

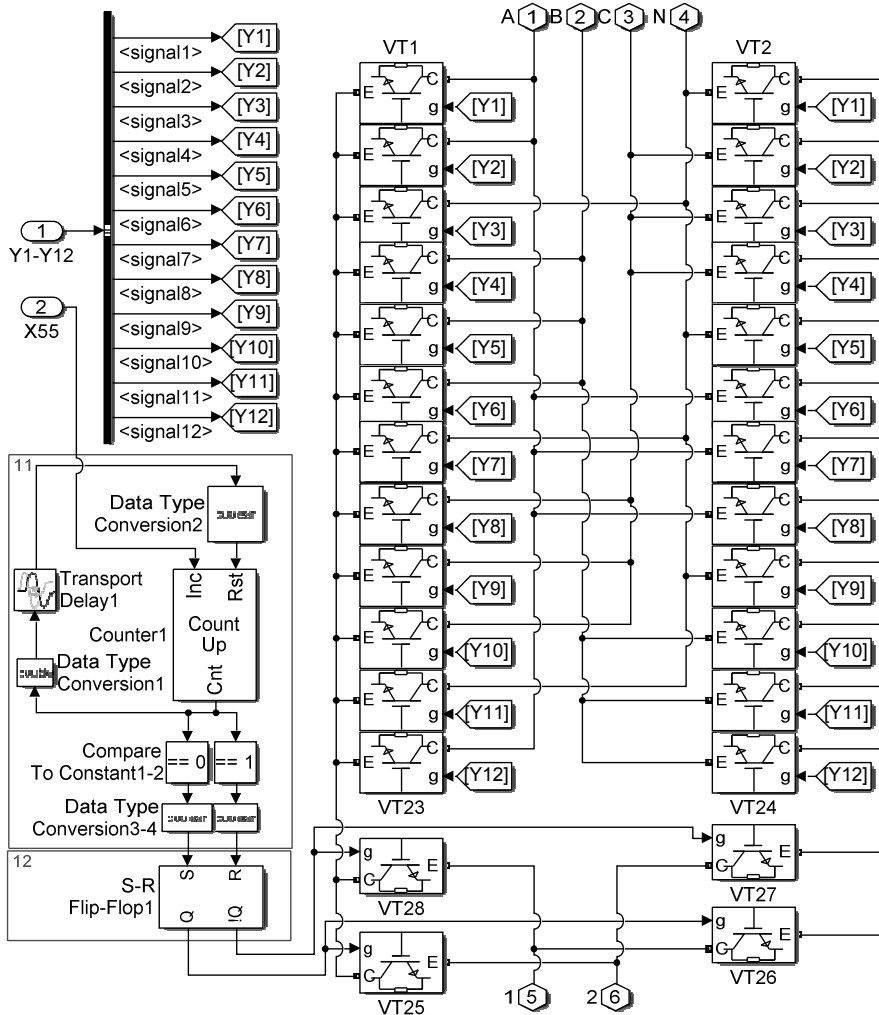


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели блока 10 БТНПЧ

Блок измерения напряжений 8 (см. рис. 1) состоит из двенадцати измерителей напряжения Voltage Measurement1–Voltage Measurement12, двенадцати блоков вычитания Add1–Add12 и двенадцати блоков модуля Abs1–Abs12. Данный блок формирует сигналы $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_{12}$ модуля отклонений мгновенных напряжений входных напряжений от заданного эталонного напряжения $u_{\text{э}}$ в соответствии с выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_1 = |u_1 - u_{\text{Э}}| = |u_{AN} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_2 = |u_2 - u_{\text{Э}}| = |u_{AC} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_3 = |u_3 - u_{\text{Э}}| = |u_{NC} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_4 = |u_4 - u_{\text{Э}}| = |u_{BC} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_5 = |u_5 - u_{\text{Э}}| = |u_{BN} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_6 = |u_6 - u_{\text{Э}}| = |u_{AB} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_7 = |u_7 - u_{\text{Э}}| = |u_{NA} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_8 = |u_8 - u_{\text{Э}}| = |u_{CA} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_9 = |u_9 - u_{\text{Э}}| = |u_{CN} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_{10} = |u_{10} - u_{\text{Э}}| = |u_{CB} - u_{\text{Э}}| \\ \Delta U_{11} = |u_{11} - u_{\text{Э}}| = |u_{NB} - u_{\text{Э}}|, \\ \Delta U_{12} = |u_{12} - u_{\text{Э}}| = |u_{AB} - u_{\text{Э}}|, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\Delta U_1 - \Delta U_{12}$ – модули отклонения напряжения; $u_1 - u_{12}$ – напряжения, формируемые на входах блока 8; $u_{\text{Э}}$ – эталонное напряжение; u_{AN}, u_{BN}, u_{CN} – прямые фазные напряжения; u_{NA}, u_{NB}, u_{NC} – обратные фазные напряжения; u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} – прямые линейные напряжения; u_{BA}, u_{CB}, u_{AC} – обратные линейные напряжения.

Блок формирования управляющих импульсов 9 (см. рис. 1) формирует импульсы управления на вентили силовой части БТНПЧ на основе напряжений $\Delta U_1 - \Delta U_{12}$ и состоит из двенадцати элементов логического «И» $AI-AI2$ и одиннадцати блоков выбора наименьшего напряжения (БВНН) $VI-VII$ [23]. При этом формирование импульсов управления происходит в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} U_{AN} = Y_1 &= U_{Q1}^{V1} \wedge U_{Q1}^{V7} \wedge U_{Q1}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{AC} = Y_2 &= U_{Q2}^{V1} \wedge U_{Q1}^{V7} \wedge U_{Q1}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{NC} = Y_3 &= U_{Q1}^{V2} \wedge U_{Q2}^{V7} \wedge U_{Q1}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{BC} = Y_4 &= U_{Q2}^{V2} \wedge U_{Q2}^{V7} \wedge U_{Q1}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{BN} = Y_5 &= U_{Q1}^{V3} \wedge U_{Q2}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{BA} = Y_6 &= U_{Q2}^{V3} \wedge U_{Q2}^{V8} \wedge U_{Q1}^{V11}; \\ U_{NA} = Y_7 &= U_{Q1}^{V4} \wedge U_{Q1}^{V9} \wedge U_{Q1}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}; \\ U_{CA} = Y_8 &= U_{Q2}^{V4} \wedge U_{Q1}^{V9} \wedge U_{Q1}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}; \\ U_{CN} = Y_9 &= U_{Q1}^{V5} \wedge U_{Q2}^{V9} \wedge U_{Q1}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}; \\ U_{CB} = Y_{10} &= U_{Q2}^{V5} \wedge U_{Q2}^{V9} \wedge U_{Q1}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}; \\ U_{NB} = Y_{11} &= U_{Q1}^{V6} \wedge U_{Q2}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}; \\ U_{AB} = Y_{12} &= U_{Q2}^{V6} \wedge U_{Q2}^{V10} \wedge U_{Q2}^{V11}. \end{aligned} \quad (2)$$

где Y_1 – Y_{12} – управляющие импульсы на вентили преобразователя; U_{Q1}^{Vn} – сигнал с первого выхода БВНН; U_{Q2}^{Vn} – сигнал со второго выхода БВНН; n – порядковый номер блока БВНН, $n = 1 \dots 11$; U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} – прямые фазные напряжения; U_{NA}, U_{NB}, U_{NC} – обратные фазные напряжения; U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – прямые линейные напряжения; U_{BA}, U_{CB}, U_{AC} – обратные линейные напряжения.

Блоки $V1$ – $V11$ осуществляют выбор предпочтительного напряжения для использования в формировании выходного напряжения и формируют управляющие импульсы на управляющие вентили БТНПЧ. Каждый блок $V1$ – $V12$ состоит из элементов Product1, Product2, Relation Operator1 – Relation Operator3, Logical Operator1, Sum1, S-R Flip–Flop1. Формирование выходных сигналов Q1, Q2 и outC осуществляется на основании сигналов на первом InA и втором InB входах блока в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} U_{Q1}^{Vn} &= \begin{cases} 0, & \text{если } U_{InA}^{Vn} > U_{InB}^{Vn}; \\ 1, & \text{если } U_{InA}^{Vn} \leq U_{InB}^{Vn}; \end{cases} \\ U_{Q2}^{Vn} &= \begin{cases} 1, & \text{если } U_{InA}^{Vn} > U_{InB}^{Vn}; \\ 0, & \text{если } U_{InA}^{Vn} \leq U_{InB}^{Vn}; \end{cases} \\ U_{outC}^{Vn} &= \begin{cases} U_{InB}^{Vn}, & \text{если } U_{InA}^{Vn} > U_{InB}^{Vn}; \\ U_{InA}^{Vn}, & \text{если } U_{InA}^{Vn} \leq U_{InB}^{Vn}; \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где U_{InA}^{Vn} и U_{InB}^{Vn} – сигналы соответственно на входе InA и InB ; U_{outC}^{Vn} – сигналы на выходах блока БВНН $outC$ соответственно.

При этом на первом входе блока БВНН $V1$ присутствует сигнал $\Delta U_1 = |u_{AN} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_2 = |u_{AC} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V2$ присутствует сигнал $\Delta U_3 = |u_{NC} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_4 = |u_{BC} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V3$ присутствует сигнал $\Delta U_5 = |u_{BN} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_6 = |u_{AB} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V4$ присутствует сигнал $\Delta U_7 = |u_{NA} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_8 = |u_{CA} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V5$ присутствует сигнал $\Delta U_9 = |u_{CN} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_{10} = |u_{CB} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V6$ присутствует сигнал $\Delta U_{11} = |u_{NB} - u_{\text{э}}|$, а на втором входе – $\Delta U_{12} = |u_{AB} - u_{\text{э}}|$. На первом входе блока БВНН $V7$ присутствует сигнал U_{outC}^{V1} , а на втором входе – U_{outC}^{V2} . На первом входе блока БВНН $V8$ присутствует сигнал U_{outC}^{V7} , а на втором входе – U_{outC}^{V3} . На первом входе

блока БВНН $V9$ присутствует сигнал U_{outC}^{V4} , а на втором входе – U_{outC}^{V5} . На первом входе блока БВНН $V10$ присутствует сигнал U_{outC}^{V9} , а на втором входе – U_{outC}^{V6} . На первом входе блока БВНН $V11$ присутствует сигнал U_{outC}^{V8} , а на втором входе – U_{outC}^{V10} .

Таким образом, при формировании выходного напряжения с заданными параметрами в любой момент времени обеспечивается подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети вне зависимости от вариации её параметров (амплитуды, частоты, формы кривой напряжения), что обеспечивает расширение функциональных возможностей НППЧ.

2. Входные параметры модели

Исследование и анализ выходного напряжения $U_{вых}$ осуществляются в соответствии со структурной схемой, предложенной в работе [24].

Входные параметры имитационной модели БТНПЧ

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Частота напряжения источника электроэнергии	$f_{ист}$	1–60	Гц
Амплитуда линейного напряжения источника электроэнергии	$U_{мист}$	14,14–2610,2	В
Значение линейного напряжения источника электроэнергии	$U_{ист}$	10–1845,7	В
Заданная амплитуда выходного напряжения БТНПЧ	$U_{мзад}$	122,6–565,7	В
Заданное значение частоты выходного напряжения	$f_{зад}$	1–60	Гц
Время начала формирования выходного напряжения	$t_{нач}$	0,042	с
Мощность нагрузки на выходе БТНПЧ (при $\cos\phi = 1$)	P_n	4	кВт

3. Результаты исследования

На рис. 3 представлены выходные характеристики БТНПЧ. Значение частоты выходного напряжения $f_{вых}$ вычислялось с помощью блоков измерения Fourier и Frequency и настраивалось относительно заданной частоты выходного напряжения $f_{зад}$. Относительное отклонение частоты выходного напряжения $\delta f_{вых}$ определялось по формуле

$$\delta f_{вых} = |f_{вых}^{max} - f_{вых}^{min}| / f_{зад}, \quad (4)$$

где $f_{вых}^{max}$ и $f_{вых}^{min}$ – соответственно максимальное и минимальное значения частоты выходного напряжения при $f_{зад} = const$ и $f_{ист} = const$.

Среднеквадратическое значение напряжения $U_{\text{вых}}$ вычислялось помощью блока *RMS*, в который заносились значения $f_{\text{зад}}$.

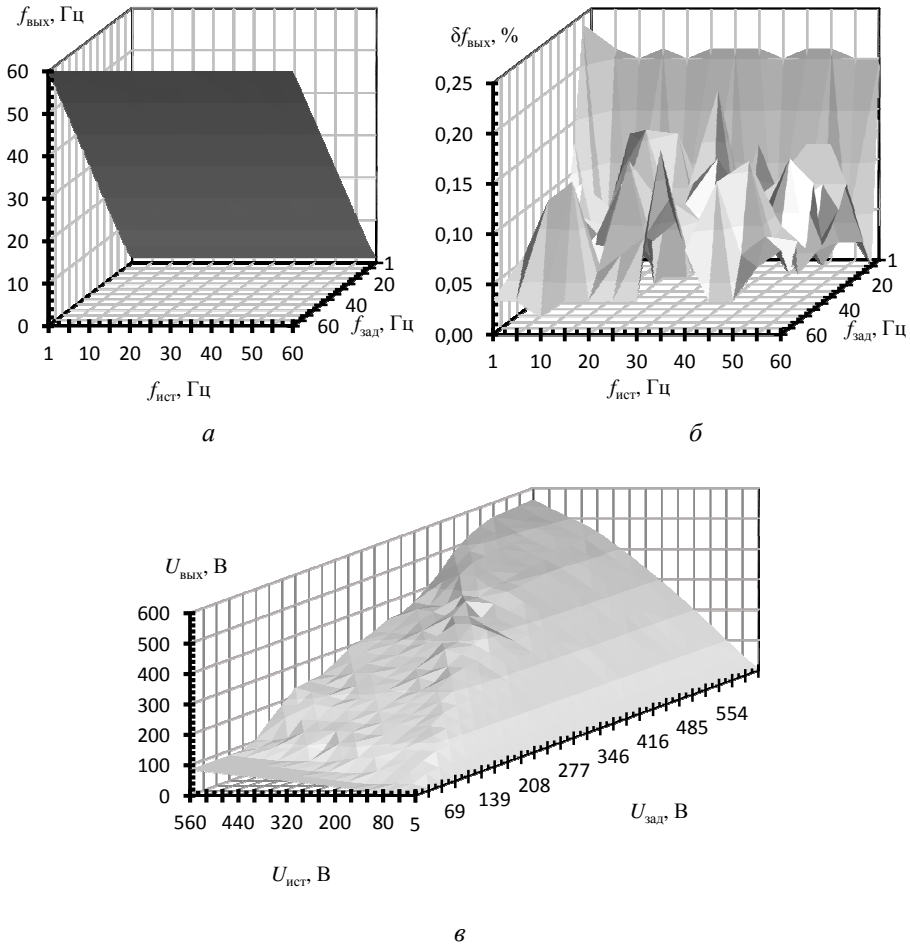


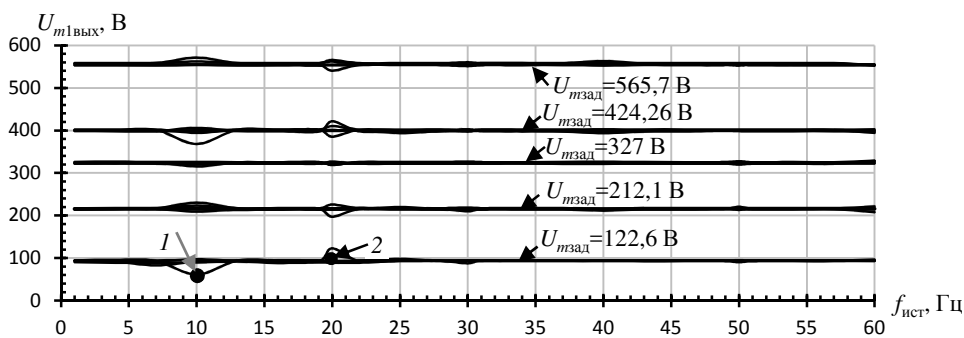
Рис. 3. Пространства выходных параметров напряжения БТНПЧ: а – пространство частоты выходного напряжения $f_{\text{вых}}$; б – пространство относительного отклонения частоты выходного напряжения $\delta f_{\text{вых}}$; в – пространство среднеквадратического значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$

Анализ выходных характеристик, представленных на рис. 3, позволяет сделать вывод, что частота напряжения на выходе БТНПЧ $f_{\text{вых}}$ соответствует значению заданной частоты $f_{\text{зад}}$ и поддерживается на данном значение вне зависимости от частоты источника электроэнергии $f_{\text{ист}}$. Относительное отклонение частоты $\delta f_{\text{вых}}$ не превышает 0,25 %. Максимальное значение $\delta f_{\text{вых}} = 0,24$ % наблюдается при $f_{\text{зад}} = 5$ Гц

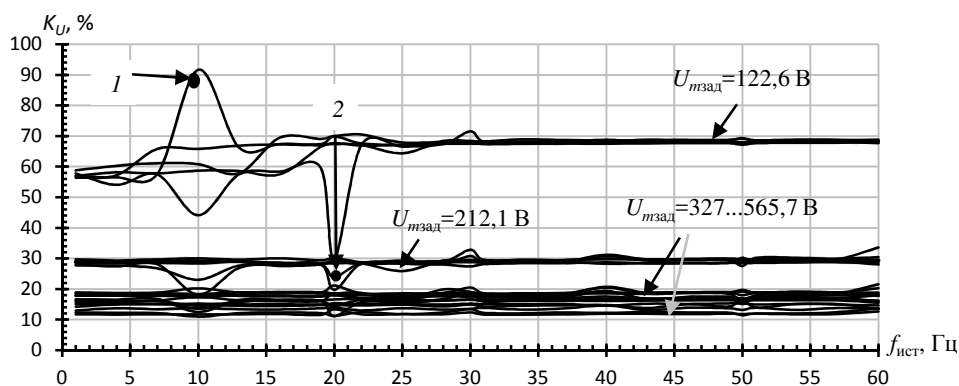
и $f_{\text{ист}} = 1$ Гц. При этом частота выходного напряжения может обеспечиваться как ниже, так и выше частоты источника электроэнергии.

Формирование выходного напряжения (см. рис. 3, в) обеспечивается в диапазоне значений входного напряжения $0,11 \cdot U_{\text{ист}} \leq U_{\text{вых}} < U_{\text{ист}}$. Зависимости $U_{\text{вых}}(U_{\text{зад}})$ и $U_{\text{вых}}(U_{\text{ист}})$ в этом же диапазоне напряжений имеют практически линейный характер. При $0 \leq U_{\text{зад}} < 0,11 U_{\text{ист}}$ формируется напряжение $U_{\text{вых}} = 0,11 U_{\text{ист}}$. Максимальное значение $U_{\text{вых}}$ не может быть выше напряжения источника электроэнергии $U_{\text{ист}}$, что характерно для непосредственных преобразователей частоты.

Определение влияния изменения частоты и амплитуды напряжения источника электроэнергии ($f_{\text{ист}}$ и $U_{\text{ист}}$) на значение амплитуды первой гармоники выходного напряжения $U_{m1\text{вых}}$ и коэффициента гармонических искажений K_U (рис. 4–6) проводилось с использованием быстрого преобразования Фурье, реализованного в блоке *Powergui*.



а



б

Рис. 4. Выходные параметры БТНПЧ при изменении частоты источника электроэнергии: а – амплитуда первой гармоники, б – коэффициент нелинейных искажений

В первом случае (см. рис. 4) проводились измерения выходных параметров при изменении частоты источника электроэнергии $f_{\text{ист}}$ при различных заданных параметрах выходного напряжения БТНПЧ: $U_{\text{мзад}} = 122,6$ В, $U_{\text{мзад}} = 212,1$ В, $U_{\text{мзад}} = 327$ В, $U_{\text{мзад}} = 424,26$ В и $U_{\text{мзад}} = 565,7$ В и $f_{\text{зад}} = 20$ Гц, $f_{\text{зад}} = 30$ Гц, $f_{\text{зад}} = 40$ Гц, $f_{\text{зад}} = 50$ Гц и $f_{\text{зад}} = 60$ Гц.

Изменение амплитуды выходного напряжения БТНПЧ $U_{\text{млвых}}$ практически не зависит не только от значения $f_{\text{ист}}$ (см. рис. 4), но и заданной частоты $f_{\text{зад}}$ (влияние параметра $f_{\text{зад}}$ наиболее подробно рассмотрено в работе [24]). При этом разброс величины коэффициента K_U при изменении $f_{\text{ист}}$ происходит в области значений от 1 до 30 Гц на исследуемых частотах и при значении $U_{\text{мзад}} = 122,6$ В. В других случаях разброс величины K_U практически незначителен.

В точках 1 и 2 (см. рис. 6, а, б) наблюдается резкое отклонение величин $U_{\text{млвых}}$ и K_U , что связано с моментами начала формирования выходного напряжения и соотношением $f_{\text{ист}}$ и $f_{\text{зад}}$ [25]. Минимальные значения K_U наблюдается при формировании выходного напряжения синфазно с одними из фазных или линейных синусоид напряжений сети (точка 2, см. рис. 6, б). Так, чем больше эталонная синусоида совпадает с одной из синусоид входного напряжения, тем меньше амплитуда высших гармоник и, соответственно, ниже значение K_U . При этом в диапазоне $0,58U_{\text{ист}} \leq U_{\text{вых}} < U_{\text{ист}}$ значение коэффициента K_U не превышает 20 %.

Во втором случае, проводились измерения выходных параметров при изменении амплитуды источника напряжения $U_{\text{мист}}$ (см. рис. 5). Измерения проводились при параметрах $U_{\text{мзад}}$ аналогичных первому случаю.

При изменении заданной частоты $f_{\text{зад}}$ (см. рис. 5, а, б) соответствующим значениям 20, 30, 40, 50 и 60 Гц и при постоянной частоте напряжения источника $f_{\text{ист}} = 50$ Гц влияние изменения частот $f_{\text{зад}}$ и $f_{\text{ист}}$ на амплитуду $U_{\text{млвых}}$ незначительно. При этом вид характеристик, изображенных на рис. 5, в, г ($f_{\text{зад}} = 50$ Гц, $f_{\text{ист}} = 20 \dots 60$ Гц), практически не отличаются от характеристик при $f_{\text{ист}} = \text{const}$. Однако при $f_{\text{ист}} = \text{const}$ разброс величин $U_{\text{млвых}}$ и K_U выше, чем при $f_{\text{зад}} = \text{const}$.

Точки 1 ($f_{\text{зад}} = 30$ Гц, $f_{\text{ист}} = 10$ Гц, $U_{\text{мзад}} = 122,6$ В, $U_{\text{ист}} = 400$ В, см. рис. 6, а), 2 ($f_{\text{зад}} = 60$ Гц, $f_{\text{ист}} = 20$ Гц, $U_{\text{мзад}} = 122,6$ В, $U_{\text{ист}} = 400$ В, см. рис. 6, б), 3 ($f_{\text{зад}} = 60$ Гц, $f_{\text{ист}} = 50$ Гц, $U_{\text{мзад}} = 565,7$ В, $U_{\text{ист}} = 350$ В, см. рис. 6, в), 4 ($f_{\text{зад}} = 50$ Гц, $f_{\text{ист}} = 50$ Гц, $U_{\text{мзад}} = 122,6$ В, $U_{\text{ист}} = 350$ В, см. рис. 6, г), 5 ($f_{\text{зад}} = 50$ Гц, $f_{\text{ист}} = 50$ Гц, $U_{\text{мзад}} = 565,7$ В, $U_{\text{ист}} = 350$ В,

см. рис. 6, д) и 6 ($f_{зад} = 50$ Гц, $f_{ист} = 60$ Гц, $U_{мзад} = 122,6$ В, $U_{ист} = 350$ В, см. рис. 6, е) иллюстрируют форму выходного напряжения в отдельных случаях, изображенных на рис. 3–5.

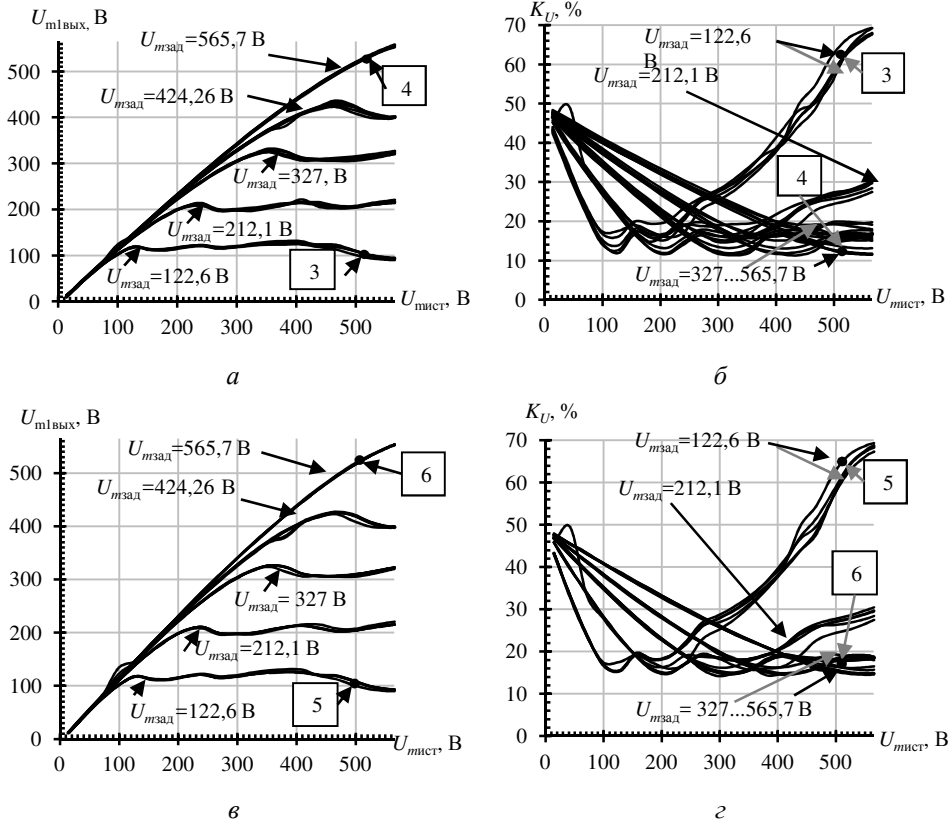


Рис. 5. Выходные параметры БТНПЧ при изменении амплитуды напряжения источника электроэнергии: а, в – амплитуда первой гармоники при изменении заданной частоты и частоты источника электроэнергии; б, г – коэффициент нелинейных искажений при изменении заданной частоты и частоты источника электроэнергии

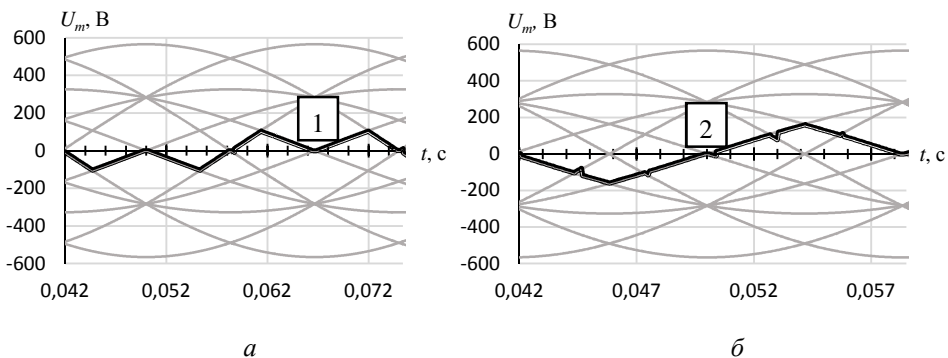


Рис. 6. Форма выходного напряжения в точках 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д) и 6 (е)

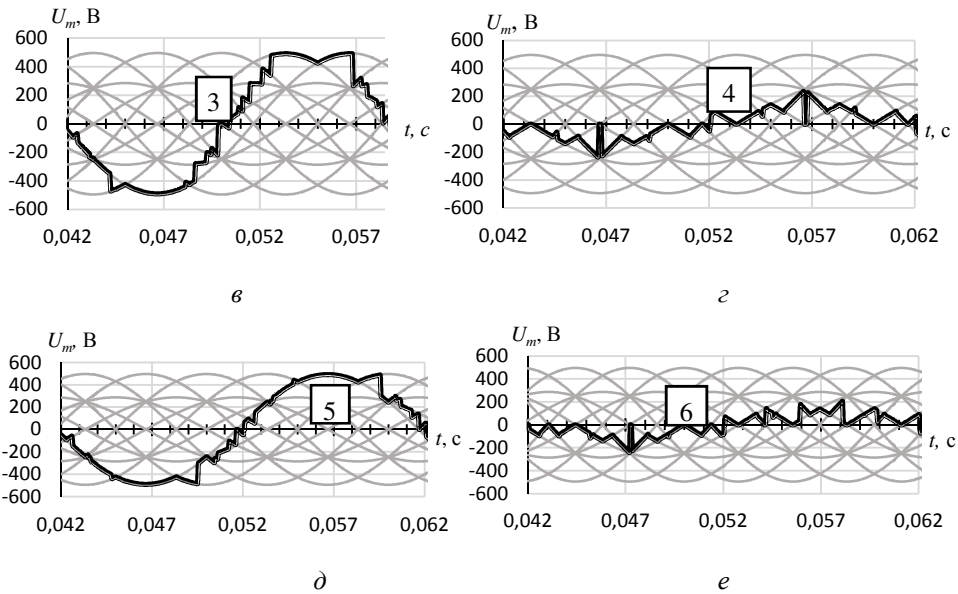
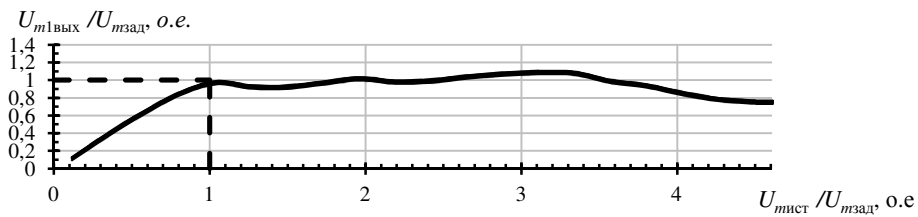
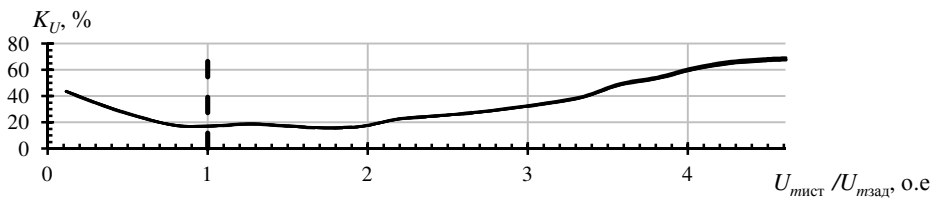


Рис. 6. Окончание

На рис. 7 изображены зависимости $U_{m1\text{ВЫХ}}(U_{m\text{ИСТ}})$ и $K_U(U_{m\text{ИСТ}})$ относительно амплитуды заданного напряжения $U_{m\text{Зад}}$. В диапазоне значений $U_{m\text{ИСТ}}/U_{m\text{Зад}}$ от 0 до 1 наблюдается линейная зависимость $U_{m1\text{ВЫХ}}(U_{m\text{ИСТ}})$ на исследуемых значениях $f_{\text{Зад}}$ и $f_{\text{ИСТ}}$.



а



б

Рис. 7. Выходные параметры БТНПЧ относительно амплитуды заданного напряжения: а – амплитуда первой гармоники выходного напряжения; б – коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения

Формирование выходного напряжения БТНПЧ в диапазоне $0,5 < U_{\text{ист}}/U_{\text{зад}} < 2,2$ является наиболее эффективным с точки зрения уменьшения генерации гармонических искажений, так, значение коэффициента K_U , не превышает 25 %. При этом значительное увеличение K_U и уменьшение $U_{m1\text{вых}}$ происходят при $U_{\text{ист}}/U_{\text{зад}} > 3,5$.

Необходимо отметить, что амплитуда выходного напряжения БТНПЧ не может быть больше амплитуды напряжения источника электроэнергии (см. рис. 3), несмотря на то, что в некоторых случаях значение амплитуды первой гармоники $U_{m1\text{вых}}$ выше амплитуды напряжения $U_{\text{ист}}$ (см. рис. 6 и 7).

4. Обобщение результатов. Анализ полученных результатов (см. рис. 3–7) и результатов работ [24, 25] позволяет сделать следующие выводы:

– частота $f_{\text{вых}}$ определяется только значением $f_{\text{зад}}$ и не зависит от частоты источника электроэнергии $f_{\text{ист}}$. Относительное отклонение частоты $\delta f_{\text{вых}}$ не превышает 0,25 %. Изменение амплитуды $U_{m1\text{вых}}$ также практически не зависит от значений $f_{\text{ист}}$ и $f_{\text{зад}}$;

– формирование заданного выходного напряжения обеспечивается в диапазоне значений входного напряжения $0,11U_{\text{ист}} \leq U_{\text{вх}} < U_{\text{ист}}$. При $0 \leq U_{\text{зад}} < 0,11U_{\text{ист}}$ формируется напряжение $U_{\text{вых}} = 0,11U_{1Л}$, а при $U_{\text{зад}} > U_{\text{ист}} - U_{\text{вых}} \approx U_{\text{ист}}$;

– в диапазоне значений $0,5 < U_{\text{ист}}/U_{\text{зад}} < 2,2$ значение K_U не превышает 25 %. Вид характеристик $U_{m1\text{вых}}(U_{\text{ист}})$ при $f_{\text{ист}} = \text{const}$ практически не отличается от характеристик при $f_{\text{зад}} = \text{const}$;

– качество выходного напряжения во многом определяется отношением $U_{\text{ист}}/U_{\text{зад}}$ и моментами начала формирования выходного напряжения $t_{\text{нач}}$ относительно одной из синусоид источника электроэнергии. Минимальные значения K_U наблюдается при формировании выходного напряжения с одной из наиболее подходящей синусоид входного напряжения.

Заключение

Результаты исследований имитационной модели БТНПЧ показали, что предложенное устройство в любой момент времени обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему эталонному сигналу входного напряжения U_1-U_{12} вне зависимости от параметров напряжения источника электроэнергии.

Установлено, что формирование заданного выходного напряжения обеспечивается в диапазоне от 11 до 100 % амплитуды линейного напряжения источника, при этом коэффициент нелинейных искажений не превышает 25 %. Частота выходного напряжения может обеспечиваться как ниже, так и выше частоты напряжения источника. В случае, когда заданные выходные параметры напряжения и параметры напряжения сети синусоидальной формы совпадают и при синфазном формировании выходного напряжения с одной из синусоид входного напряжения, преобразователь позволяет сформировать практически синусоидальную форму выходного напряжения.

Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты может быть использован для питания частотно-управляемых электроприводов переменного тока в автономных энергоустановках с переменной частотой вращения привода генератора для получения выходного напряжения стабильной частоты.

Библиографический список

1. Mukund R. Patel Shipboard Propulsion, Power Electronics and Ocean Energy. – CRC Press, 2012. – 379 p.
2. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник по курсу «Полупроводниковые преобразователи» / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский, А.И. Черевко, М.М. Музыка; Сев. федер. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2015. – 555 с.
3. Лемин Л.А., Пруссаков А.В., Григорьев А.В. Эксплуатация судовых систем электроснабжения: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2006. – 184 с.
4. Comparative Case Study on Oscillatory Behavior in Power Systems of Marine Vessels With High Power Converters / T. Tarasiuk, P. Jankowski, V. Shagar, A. Pilat, M. Gorniak, J. Nowak // *Frontiers in Energy Research*. – 2021. – Vol. 8 (529756). – P. 1–14. DOI: 10.3389/fenrg.2020.529756
5. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors / P. Gnaciński [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 152193–152203. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133

6. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
7. Technical cross-fertilization between terrestrial microgrids and ship power systems / R.E. Hebner [et al.] // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. – 2020. – Vol. 4, № 2. – P. 161–179.
8. 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.
9. 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
10. Frequency fluctuations in marine microgrids: origins and identification tools / T. Tarasiuk, Y. Zunino, M. Bueno-Lopez, F. Silvestro, A. Pilat, M. Molinas // IEEE Electrification Magazine. – 2020. – Vol. 8(3). – P. 40–46. DOI:10.1109/MELE.2020.3005698
11. Анисимов Я.Ф. Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках. – Ленинград: Судостроение, 1973. – 227 с.
12. Штрумпф Э.П. Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: учебник. – СПб: Судостроение, 1993. – С. 319–335.
13. 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 мор. и реч. флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – № 4(44). – С. 829–837. DOI:10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837
14. Григорьев А.В., Колесниченко В.Ю. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций // Вестник Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 6(28). – С. 39–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43
15. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
16. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р., Малышев С.М. Перспективы применения статических источников электроэнергии с системами электродвижения // Вестник Гос. ун-та мор. и реч. флота

им. адм. С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

17. Герасимов А., Толмачев К., Уткин К. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля // Новости электротехники: Интернет-журнал. – 2005. – № 4(34). – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/>

18. Обухов С.Г., Плотников И.А. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2015. – Т. 326, № 6. – С. 95–102.

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

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

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

22. Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook / ed. by Muhammad H. Rashid. – 3rd ed. – Elsevier Inc., 2011. – 1390 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3

23. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты: пат. 2691968 Рос. Федерация, МПК H02M 5/27 / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; – № 2018123270; заявл. 26.06.2018; опубли. 19.06.2019. Бюл. № 17.

24. Сугаков В.Г., Варламов Н.С. Анализ выходного напряжения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты при изменении частоты эталонного сигнала // Великие реки – 2020: тр. 22-го Междунар. науч.-пром. форума. – Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2020. – С. 1–4.

25. Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Особенности формирования выходного напряжения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева, 2020. – С. 36–40. DOI: 10.46960/39255930_2020_36

References

1. Mukund R. Patel Shipboard Propulsion, Power Electronics and Ocean Energy. CRC Press, 2012, 379 p.
2. Dmitriev B.F., Riaben'kii V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M. Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli [Ship Semiconductor converters]. 2nd ed. Arkhangel'sk: Severnyi (Arkticheskii) federal'nyi universitet imeni M.V. Lomonosova, 2015, 555 p.
3. Lemin L.A., Prussakov A.V., Grigor'ev A.V. Eksploatatsiia sudovykh sistem elektrosnabzheniia [Operation of ship power supply systems]. Saint Petersburg: Gosudarstvennaia morskaiia akademiia imeni admirala S.O. Makarova, 2006, 184 p.
4. Tarasiuk T., Jankowski P., Shagar V., Pilat A., Gorniak M., Nowak J. Comparative Case Study on Oscillatory Behavior in Power Systems of Marine Vessels With High Power Converters. *Frontiers in Energy Research*, 2021, vol. 8 (529756), pp. 1-14. DOI: 10.3389/fenrg.2020.529756
5. Gnaciński P. et al. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 152193-152203. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133
6. Anisimov Ia.F., Vasil'ev E.P. Elektromagnitnaia sovместimost' poluprovodnikovyykh preobrazovatelei i sudovykh elektroustanovok [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship electrical installations]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 264 p.
7. Hebner R.E. et al. Technical cross-fertilization between terrestrial microgrids and ship power systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 161-179.
8. 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.
9. 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
10. Tarasiuk T., Zunino Y., Bueno-Lopez M., Silvestro F., Pilat A., Molinas M. Frequency fluctuations in marine microgrids: origins and identification tools. *IEEE Electrification Magazine*, 2020, vol. 8(3), pp. 40-46. DOI:10.1109/MELE.2020.3005698

11. Anisimov Ia.F. Osobennosti primeneniia poluprovodnikovyykh preobrazovatelei v sudovykh elektroustanovkakh [Features of the use of semiconductor converters in ship electrical installations]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 227 p.

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. Sugakov V.G., Varlamov N.S., Malyshev Iu.S. Obosnovanie realizatsii fazosmeshchaiushchego ustroystva s korrektsiei koda v zavisimosti ot chastoty napriazheniia [Rationale for realization of phaseshifting 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

14. Grigor'ev A.V., Kolesnichenko V.Iu. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii sudovykh dizel'nykh elektrostantsii [Improving the efficiency of marine diesel power plants]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2014, no. 6(28), pp. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43

15. Khvatov O.S., Dar'enkov A.B., Tarasov I.M. Dizel'-generatornaia elektrostantsiia s peremennoi chastotoi vrashcheniia vala [Diesel-generator Power Plant with Shaft Frequency Rotation]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2010, no. 2, pp. 53-57.

16. Grigor'ev A.V., Zainullin R.R., Malyshev S.M. Perspektivy primeneniia staticheskikh istochnikov elektroenergii s sistemami elektrodvizheniia [Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 829-837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

17. Gerasimov A., Tolmachev K., Utkin K. Dizel'-generatornye elektrostantsii. Rabota pri peremennoi chastote vrashcheniia dizelia [Diesel-generator power plants. Work at variable speed of diesel engine rotation]. *Novosti elektrotekhniki: Internet-zhurnal*, 2005, no. 4(34), available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/>

18. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Eksperimental'nye issledovaniia dizel'-generatornoi ustanovki na peremennoi chastote vrashcheniia [Experi-

mental studies of variable speed diesel generator units]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 95-102.

19. GOST 32144-2013. Elektricheskaiia energiiia. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia [GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Moscow: Standartinform, 2014, 6 p.

20. Pravila Rossiiskogo rechnogo registra [Russian River Register Rules]. Moscow: Rossiiskii rechnoi registr, 2017, vol. 2. Pravila klassifikatsii i postroiiki sudov (PKPS), 1885 p.

21. Pravila klassifikatsii i postroiiki 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 rechnoi registr sudokhodstva, 2018, 131 p.

22. Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook. Ed. by Muhammad H. Rashid. 3rd ed. Elsevier Inc., 2011, 1390 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3

23. Sugakov V.G., Khvatov O.S., Varlamov N.S. Bestransformatorniye neposredstvennyi preobrazovatel' chastoty [Transformer-free direct frequency converter]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2691968.

24. Sugakov V.G., Varlamov N.S. Analiz vykhodnogo napriazheniia bestransformatornogo neposredstvennogo preobrazovatel'ia chastoty pri izmenenii chastoty etalonnogo signala [Analysis of the output voltage a transformer-free direct frequency converter when the frequency of the reference signal changing]. *Velikie reki - 2020. Trudy 22-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma*. N. Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2020, pp. 1-4.

25. Sugakov V.G., Varlamov N.S., Malyshev Iu.S. Osobennosti formirovaniia vykhodnogo napriazheniia bestransformatornogo neposredstvennogo preobrazovatel'ia chastoty [Features of the formation a output voltage of the transformer-free direct frequency converter]. *Aktual'nye problemy elektroenergetiki. Sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei*. N. Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni R.E. Alekseeva, 2020, pp. 36-40. DOI: 10.46960/39255930_2020_36

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

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

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

Yurij S. Malyshev (Nizhnii Novgorod, Russian Federation) – 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, Nesterova str., 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru).

Получено 30.12.2020