

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY IN SHIP POWER SYSTEMS

V. V. Romanovskiy, A. S. Bezhik

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

At present, with the rise in the cost of energy resources and the negative impact of the marine fleet on the environment, the problem of energy efficiency in the shipping industry is becoming important. Most of the technical processes carried out on a ship board are somehow associated with the consumption of electrical energy, which, in turn, leads to stricter requirements for the quality of electrical energy. This is explained by the fact that the various consumers of electrical energy are designed to operate at certain values of electrical parameters such as rated current, rated voltage, rated frequency of the electrical network. In this case, it is necessary to take into account the fact that, due to the inhomogeneity of current-voltage characteristics, a large number of consumers can adversely affect the symmetry of voltage and current. This phenomenon can be partially reduced by introducing electrical energy converters to power consumers, including electric motors, which also allows the speed to be controlled in a wide range. However, commutations occurring in conversion technology will be a source of higher harmonics. In order to minimize the influence of semiconductor converters of electrical energy on the network, manufacturers can implement the following technical solutions: increasing the number of voltage ripples in the input rectifier; installation of a network choke; the use of an active harmonic filter; the use of smoothing filters in the DC link. The ways to improve the quality of electrical energy by introducing higher harmonic filters are discussed in the paper. Equations are written to determine the parameters of the elements included in the filters. A computer model of the considered electric power plant in the environment of dynamic modeling of technical systems SimInTech has been compiled. The graphs of voltage and current changes at active-inductive load are taken.

Keywords: ship power system, SimInTech, network choke, smoothing filter, sine filter, quality of electrical energy.

For citation:

Romanovskiy, Victor V., and Artem S. Bezhik. "Improving the quality of electric energy in ship power systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.

УДК 621.315:621.3.025

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В. В. Романовский, А. С. Бежик

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена изучению проблемы энергоэффективности, которая приобретает важное значение в судоходной отрасли. Отмечается, что большинство технических процессов, выполняемых на борту судна, так или иначе связаны с потреблением электрической энергии, что, в свою очередь, приводит к ужесточению требований, предъявляемых к качеству электрической энергии. Объясняется это тем, что различные потребители электрической энергии спроектированы для функционирования при определенных значениях электрических параметров, таких как номинальный ток, номинальное напряжение

и номинальная частота электрической сети. При этом необходимо учитывать тот факт, что ввиду неоднородности вольтамперных характеристик большое количество потребителей может оказывать отрицательное влияние на симметрию напряжения и тока. Данное явление может быть частично ослаблено путем внедрения преобразователей электрической энергии для питания потребителей, в том числе электрических двигателей, что также позволяет регулировать частоту вращения в широком диапазоне. Однако коммутации, протекающие в преобразовательной технике, будут являться источником высших гармоник. С целью минимизации влияния полупроводниковых преобразователей электрической энергии на сеть производителями могут быть использованы следующие технические решения: увеличение количества пульсаций напряжения входного выпрямителя, установка сетевого дросселя, применение активного фильтра гармоник, использование сглаживающих фильтров в DC-звене. В статье рассмотрены способы улучшения качества электрической энергии путем внедрения фильтров высших гармоник; записаны уравнения, позволяющие определить параметры элементов, входящих в фильтры; составлена компьютерная модель рассматриваемой электроэнергетической установки в среде динамического моделирования технических систем SimInTech; сняты графики изменения напряжения и тока при активно-индуктивной нагрузке.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, SimInTech, сетевой дроссель, сглаживающий фильтр, синус-фильтр, качество электрической энергии.

Для цитирования:

Романовский В. В. Повышение качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах / В. В. Романовский, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.

Введение (Introduction)

В судоходной отрасли при росте стоимости энергоресурсов и отрицательного воздействия морского флота на состояние окружающей среды проблема энергоэффективности приобретает важное значение. При этом судостроительная промышленность все больше сосредотачивается на концепциях электроэнергетических систем, улучшающих электромагнитную совместимость установленных потребителей, так как разные производители выдвигают определенные требования к качеству электрической энергии, потребляемой их продукцией [1].

Судовые гребные установки, имеющие в комплексе гребные электрические двигатели (ГЭД) с регулируемой частотой вращения, все чаще находят применение в морской промышленности. Объясняется это тем, что установка обладает повышенной надежностью благодаря расширенному дублированию систем и улучшенной маневренности. При подключении к преобразователю частоты двигатель переменного тока демонстрирует уникальные свойства в обеспечении скорости вращения от состояния покоя до значений, превышающих номинальные, а также в обеспечении точного управления крутящим моментом. Регулирующие и управляющие свойства морских преобразователей частоты позволяют использовать один и тот же тип преобразователей частоты со всеми приводами на борту [2]. Даже оборудование с гидравлическим приводом может быть успешно заменено электроприводами с регулируемой частотой вращения, позволяющими выполнять поставленные задачи с требуемыми технико-экономическими параметрами. Однако применение большого количества электрических потребителей, имеющих в комплексе полупроводниковые элементы, негативно сказывается на качестве питающей сети.

В настоящее время применяемые преобразователи электрической энергии работают по принципу двойного преобразования. Так, электрическая энергия сначала поступает на питающие шины выпрямителя, который может быть неуправляемым или управляемым, где выполняется преобразование переменных напряжения и тока в постоянные. Далее с целью получения напряжения и тока с требуемыми параметрами выполняется преобразование на базе инвертора из выпрямленных значений в переменные. Однако необходимо учитывать тот факт, что работа выпрямителей может негативно сказываться на гармоническом составе электрической энергии питающей сети [3], а преобразования, происходящие в инверторе, могут привести к искажениям электрической энергии, питающей потребителя.

С целью минимизации влияния полупроводниковых преобразователей электрической энергии на сеть производителями могут быть выполнены следующие технические решения [4]: увеличено количество пульсаций напряжения входного выпрямителя; выполнена установка сетевого дросселя; применен активный фильтр гармоник; использованы сглаживающие фильтры в DC -звене.

Целью данной статьи является решение следующих задач:

- рассмотрение способов улучшения качества электрической сети;
- описание способов расчета параметров электрических элементов;
- создание компьютерной модели рассматриваемой электроэнергетической установки в среде динамического моделирования технических систем SimInTech;
- снятие графиков тока и напряжения нагрузки.

Методы и материалы (Methods and materials)

Электродвигатели переменного тока с регулируемой частотой вращения в большинстве случаев устанавливаются в гребных электрических установках (ГЭУ) на судах, требующих улучшения маневренных характеристик. Преобразователи частоты (ПЧ), применяющие инверторные блоки с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), выполненные на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) или тиристоров с интегрированным управлением (IGCT), обеспечивают наиболее точный контроль крутящего момента с оптимальным потреблением электрической энергии [5], [6].

На рис. 1 представлена компьютерная модель электроэнергетической системы, в состав которой входит преобразователь частоты, выполненный в среде динамического моделирования технических систем SimInTech (код продукта BF6AA64B757). Представленная компьютерная модель сформирована из следующих элементов:

- источника электрической энергии;
- управляемого выпрямителя с системой управления;
- инвертора;
- нагрузки.

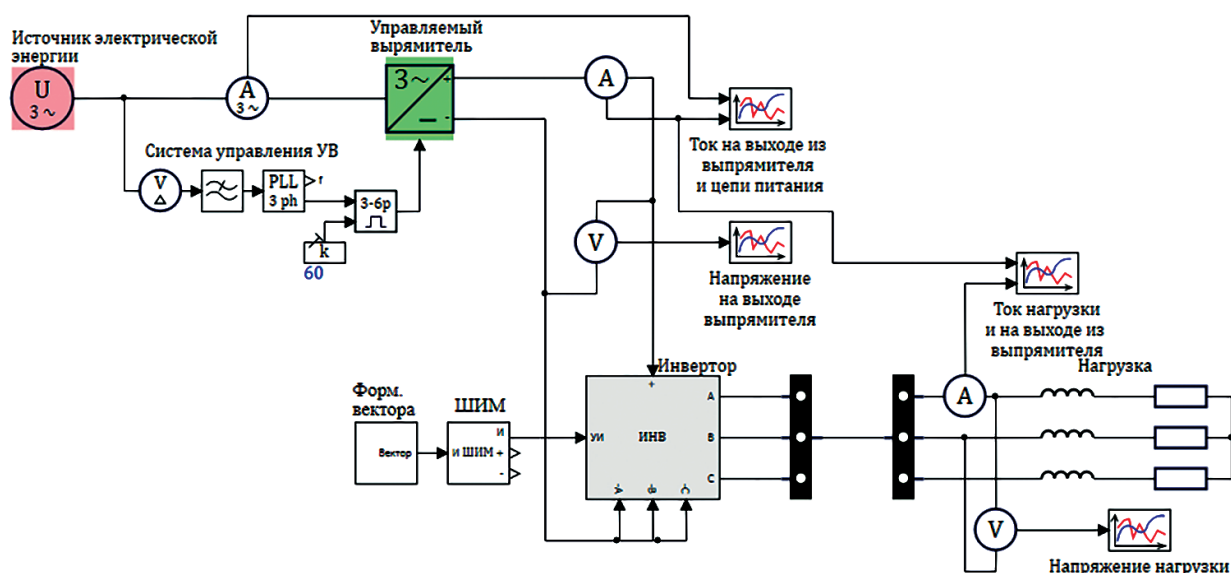
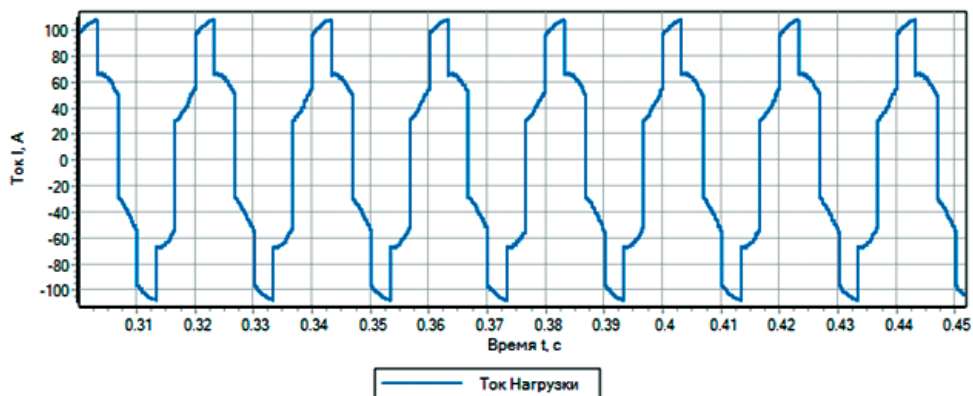


Рис. 1. Компьютерная модель электроэнергетической системы

Частотные преобразователи электрической энергии, входящие в состав электроэнергетической системы (см. рис. 1), как и многие другие питающиеся от сети переменного тока электрические потребители, могут искажать форму потребляемого тока [7], [8] из-за его нелинейной зависимости от напряжения, поскольку выпрямитель в большинстве случаев неуправляемый,

так же, как и выходные ток и напряжение электрического преобразователя частоты, тоже имеют искаженную форму из-за наличия множества гармоник, возникающих вследствие работы ШИМ-инвертора [9]. На рис. 2 показаны графики тока и напряжения на нагрузке, полученные при помощи компьютерной модели (см. рис. 1). Видно, что полученные графики далеки от идеальной синусоиды.

а)



б)

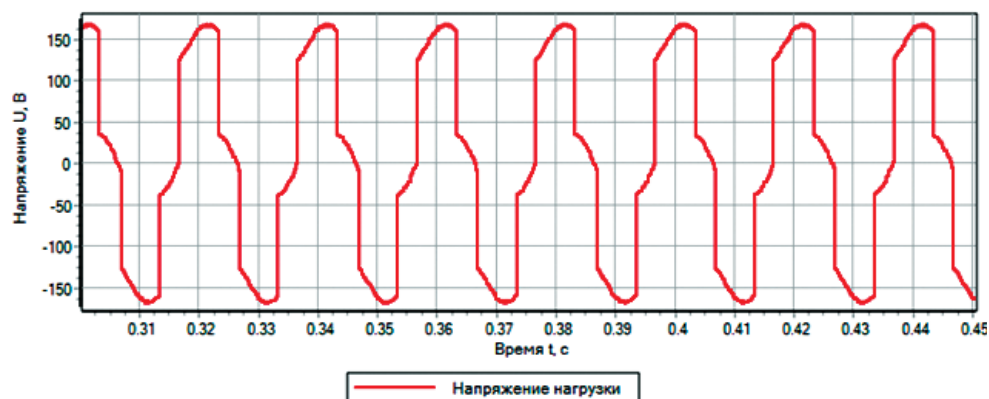


Рис. 2. Графики, полученные при помощи компьютерной модели без дросселей и фильтров:
а — тока; б — напряжения

Данные искажения тока в процессе регулярного питания статора электродвигателя приводят к уменьшению срока службы изоляции обмоток, ускорению износа подшипников, усилению шума работы, а также повышению вероятности возникновения тепловых и электрических пробоев обмоток. Для питающей сети наличие частотного преобразователя приводит к возникновению помех, способных повредить другую электрическую систему, питающуюся от этой же сети. С целью устранения ранее изложенных проблем совместно с частотными преобразователями и электродвигателями устанавливают дополнительно входные и выходные фильтры, которые уменьшают вредные искажения, оказывающие влияние на питающую сеть и питаемый данным частотным преобразователем электродвигатель [10].

Входные фильтры применяются с целью подавления помех, создаваемых выпрямителем и ШИМ-инвертором преобразователя частоты, уменьшая вызванные искажениями негативные факторы, влияющие на источник электрической энергии, тогда как электрические фильтры, устанавливаемые со стороны нагрузки, защищают электродвигатель от искажений в форме напряжений, генерируемых ШИМ частотного преобразователя. Фильтрами, применимыми со стороны источников электрической энергии, могут являться дроссели и электромагнитные импульсные (ЭМИ) фильтры, а выходными фильтрами — синфазные фильтры, дроссели, синус-фильтры и фильтры dU / dt (рис. 3).

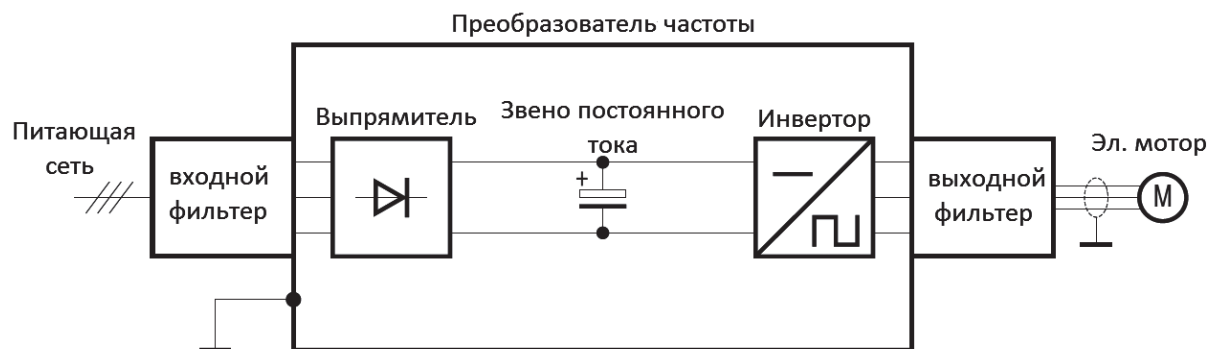


Рис. 3. Блок-схема преобразователя с входным и выходным фильтрами

Сетевой дроссель, включаемый между питающей сетью и частотным преобразователем (рис. 4), является своего рода буфером, предотвращающим проникновение в сеть со стороны преобразователя частоты высших гармоник. Кроме того, сетевой дроссель ограничивает скачки напряжения, поступающие в питающую сеть [11] в процессе возникновения бросков тока, возникающих вследствие коммутаций в преобразователе частоты.

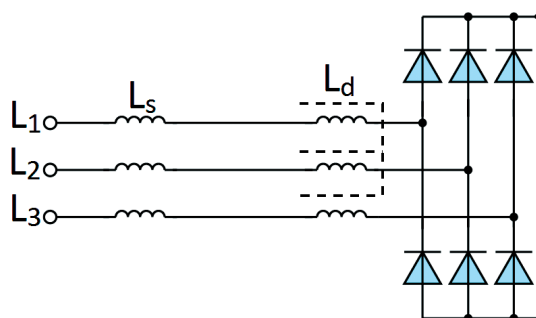


Рис. 4. Схема подключения сетевого дросселя

При выборе величины индуктивности необходимо принимать во внимание уравнение (1), учитывающее взаимосвязь индуктивности сетевого дросселя L_d и питающей сети с источником электрической энергии L_s :

$$L_d \geq U_{Tm} / (di_T / dt) - L_s, \quad (1)$$

где U_{Tm} — амплитуда напряжения блокировки, возникающего перед коммутацией полупроводникового ключа; $(di_T / dt)_{crit}$ — нарастание тока проводимости в полупроводниковом ключе; L_s — общая индуктивность питающей сети с источником электрической энергии.

Если при расчете выбранной величины будет выполняться условие $L_d \leq 0$, то применение сетевого дросселя не является целесообразным, так как величина производной тока в достаточной мере ограничивается индуктивностью питающей сети. На практике подбор величины индуктивности сетевого дросселя осуществляется путем определения величины падения напряжения на индуктивности [12], которое должно находиться в пределах 2–5 % от номинального напряжения питающей сети:

$$U_L = 2\pi f L_d I, \quad (2)$$

где f — частота напряжения питающей сети; I — номинальный ток нагрузки; L_d — индуктивность сетевого дросселя.

При конструировании электроэнергетической системы, согласно рекомендации производителей, при питании группы преобразователей частоты от одной питающей сети рекомендуется оснащать каждый преобразователь частоты отдельным сетевым дросселем, а не применять общий

сетевой дроссель ко всей группе. Объясняется это тем, что в режимах частичной нагрузки (если задействованы не все преобразователи частоты, находящиеся в группе) общий сетевой дроссель не сможет в полном объеме выполнять свои функции. Однако необходимо учитывать, что применение индивидуальных сетевых дросселей является более дорогостоящим, чем применение единственного сетевого дросселя для всей группы.

Сглаживающие фильтры, устанавливаемые в звене постоянного тока, применяются с целью минимизации переменной составляющей (ограничения коэффициента пульсаций) напряжения и тока с незначительным влиянием на постоянную составляющую. Оценить эффективность сглаживающего фильтра позволяет расчет коэффициента сглаживания:

$$\beta_s = k_{p1} / k_{p2}, \quad (3)$$

где k_{p1} и k_{p2} — коэффициенты пульсации на выходе и входе выпрямителя.

Простейшим видом сглаживающего фильтра является конденсатор большой емкости, подключаемый к выходу звена постоянного тока. Однако результирующий коэффициент сглаживания при протекании значительных токов в звене постоянного тока может быть незначительным. В данном случае возникает необходимость в применении сглаживающих фильтров более сложной конфигурации с применением дросселей, электронных ламп или транзисторов, а также выполнении увеличения количества фильтрующих звеньев.

Часто применяемыми в звене постоянного тока сглаживающими фильтрами (рис. 5) являются индуктивный, индуктивно-емкостной типа Г, индуктивно-емкостной типа П.

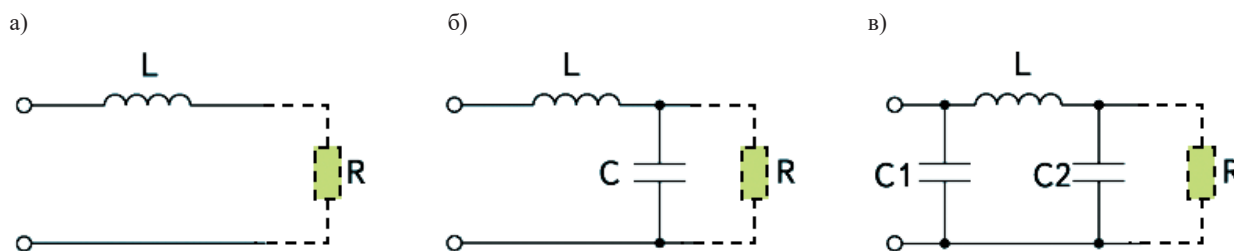


Рис. 5. Электрические схемы сглаживающих фильтров звена постоянного тока:

а — индуктивный; б — индуктивно-емкостной типа Г;

в — индуктивно-емкостной типа П

При применении индуктивного сглаживающего фильтра (см. рис. 4, а) необходимо выбирать такие параметры элементов, чтобы активное сопротивление нагрузки R_n было значительно больше, чем сопротивление дросселя ($R_n \gg r_L$), но гораздо меньше индуктивного сопротивления ($R_n \ll X_L$). Таким образом, почти вся переменная составляющая напряжения будет направлена к дросселю, тогда как постоянная — к преобразователю частоты [13]. Выбрав требуемый коэффициент сглаживания, величина индуктивности фильтра может быть определена следующим выражением:

$$L = ((1 - \beta_s)(R_n + r)) / 2\pi f m \beta_s, \quad (4)$$

где r — внутреннее сопротивление цепи выпрямителя; m — коэффициент, зависящий от отношения величины частоты основной гармоники выпрямленного напряжения к частоте тока сети.

Напряжение на входе индуктивного сглаживающего фильтра можно представить с помощью ряда Фурье:

$$U_{\text{вх}} = \frac{2U_{2\text{м}}}{\pi} - \frac{4U_{2\text{м}}}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4U_{2\text{м}}}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots, \quad (5)$$

где $\frac{2U_{2\text{м}}}{\pi}$ — средняя величин выпрямленного напряжения; $\frac{4U_{2\text{м}}}{3\pi}$ — первая гармоника выпрямленного напряжения.

В представленном ряде Фурье вторая гармоника равна лишь 20 % от основной, тогда как третья — 8,6 %, вследствие чего ими можно пренебречь. Учитывая это, напряжение на входе фильтра будет определяться следующим уравнением:

$$U_{\text{вх}} = \frac{2U_{2\text{м}}}{\pi} - \frac{4U_{2\text{м}}}{3\pi} \cos 2\omega t = U_0 + U_{\text{max вх}} \cos 2\omega t. \quad (6)$$

Максимальное выходное напряжение можно определить при помощи закона Ома:

$$U_{\text{max.вых}} = \frac{U_{\text{max.вх}}}{Z} R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{max вх}}}{\sqrt{R_{\text{н}}^2 + (\omega L)^2}} = \frac{4U_{2\text{max}}}{3\pi} \frac{R_{\text{н}}}{Z}, \quad (7)$$

где $Z = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + (\omega L)^2}$ — полная величина сопротивления.

Действующее значение напряжения пульсаций на выходе индуктивного сглаживающего фильтра составляет

$$U_{\text{н}} = U_{\text{max вх}} R_{\text{н}} / Z\sqrt{2}. \quad (8)$$

Индуктивные фильтры обладают следующими достоинствами:

- упрощенная конструкция;
- малые потери мощности;
- низкая стоимость;
- коэффициент сглаживания повышается с увеличением индуктивности и числа фаз питающей сети.

Учитывая ранее изложенное, данный тип сглаживающих фильтров в большинстве случаев применяется в многофазных мощных выпрямителях [14]. Однако необходимо учитывать вероятность появления перенапряжений вследствие возникновения скачкообразного изменения величины нагрузки, что приводит к необходимости применения дополнительных защитных устройств (разрядные устройства) параллельно обмотке дросселя.

Минимизация искажений выпрямленного напряжения будет более эффективной, если объединить предыдущий тип фильтра с параллельно подключенным конденсатором (рис. 4, б), который также позволяет повысить среднее значение выпрямленного напряжения. Данные типы сглаживающих фильтров называют *LC-фильтрами типа Г*. Параметры простейшего Г-образного индуктивно-емкостного фильтра подбирают таким образом, чтобы выполнялись следующие требования:

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{m\omega C_{\Phi}} \ll R_{\text{н}}; \\ X_L &= m\omega L_{\Phi} \gg X_C; \\ X_L &\gg R_{\text{н}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициент сглаживания индуктивно-емкостного сглаживающего фильтра типа Г определяется следующим образом:

$$C_{\Phi} L_{\Phi} = \frac{(\beta_s + 1)10^6}{m^2 \omega^2}. \quad (10)$$

Максимальная величина основной гармоники тока, протекающего через дроссель:

$$I_{\text{max}} = \frac{4U_{2\text{max}} / 3\pi}{j(X_L - X_C)}. \quad (11)$$

Максимальная величина переменного напряжения на выходе индуктивно-емкостного сглаживающего фильтра:

$$U_{\text{м.вых}} = I_{\text{м}} (-jX_C). \quad (12)$$

Расчет параметров индуктивно-емкостного фильтра типа Г необходимо выполнять, обеспечивая равенство постоянной составляющей тока I_0 и пиковых значений переменной составляющей $I_{\max}$ во избежание возникновения колебательного процесса [15], вызванного критическим значением индуктивности, которая может быть найдена следующим способом:

$$L_{\text{кр}} = R_n / 3\pi f. \quad (13)$$

В случае, если требуется улучшить коэффициент сглаживания, то индуктивно-емкостной фильтр типа Г может быть изменен путем внедрения дополнительного звена, тем самым формируется сглаживающий фильтр типа П (рис. 4, в) [16]. При данном типе фильтра коэффициент сглаживания может быть рассчитан следующим образом:

$$\beta_s = \frac{2rC_1}{(m^2 - 1)H} (m^2 \omega^2 LC_2 - 1), \quad (14)$$

где H — напряженность магнитного поля.

В индуктивно-емкостном сглаживающем фильтре типа П коэффициент сглаживания будет достигать максимальной величины при равенстве емкостей: $C_1 = C_2$. Данный тип сглаживающего фильтра может быть разделен и рассмотрен как два фильтра:

- емкостный фильтр;
- индуктивно-емкостный фильтр типа Г.

Действующее значение напряжения пульсаций на выходе индуктивно-емкостного сглаживающего фильтра типа П составит:

$$U_{\text{п. вых}} = \frac{U_{\text{п. вх}}}{\beta_s} = \frac{\Delta U_{C1}}{2\sqrt{3}} \frac{1}{(\omega^2 LC - 1)}, \quad (15)$$

где $U_{\text{п. вх}} = \frac{\Delta U_{C1}}{2\sqrt{3}}$ — действующее значение напряжения пульсаций на входе индуктивно-емкостного фильтра типа П.

В случае, если при применении одиночного сглаживающего фильтр коэффициент сглаживания все еще не удовлетворяет требованиям, то он может быть улучшен путем объединения двух и более фильтров в каскад, вследствие чего общий коэффициент сглаживания полученной системы будет рассчитываться следующим образом:

$$\beta = \beta_{s1} \beta_{s2}, \quad (16)$$

где β — общий коэффициент сглаживания; β_{s1} , β_{s2} — коэффициенты сглаживания одиночных фильтров.

При этом необходимо учитывать, что усложнение структуры сглаживающего фильтра в значительной мере оказывает влияние на выходные параметры всего звена постоянного тока. Объясняется это возникновением больших колебаний тока и напряжения в процессе коммутаций полупроводниковых ключей. При использовании сглаживающего фильтра необходимо учитывать, что его применение существенно сказывается на выходной характеристике всей выпрямительной схемы. При переходных процессах, протекающих вследствие включения и выключения выпрямителя, из-за резонансного характера LC -звена в цепи могут возникнуть значительные осцилляции тока или напряжения.

Принцип работы большинства применяемых ПЧ основан на ШИМ, где выходное напряжение формируется определенной последовательностью импульсов, имеющих очень малое время нарастания. Однако необходимо принять во внимание тот факт, что крутизна нарастания напряжения (du / dt) выходных импульсов, а также увеличивающаяся частота переключения, применяемая в инверторах, могут привести к возникновению паразитных явлений в питающем кабеле и непосредственно в самом электромоторе [17]. Данные явления значительно сокращают период эксплуа-

тации электромотора и увеличивают вероятность возникновения поломок в ГЭУ в целом. Наиболее часто встречающимися проблемами в этом случае являются:

- высокая скорость нарастания напряжения (du / dt), что оказывает негативное влияние на изоляционные материалы кабеля и обмотки электродвигателя;
- перенапряжение на клеммах электродвигателя является результатом возникающего волнового явления, так называемого *эффекта стоячей волны*;
- создание высокого уровня шума работы электродвигателя гармониками с более высокой частотой, что оказывает негативное влияние на качество обслуживания приводной системы;
- наличие высших гармоник способствует повышению температуры в электродвигателе и обмотке, что снижает КПД в целом всей ГЭУ.

В ГЭУ управление гребным электрическим двигателем осуществляется путем контроля параметров на выходе преобразователя частоты. Однако в процессе коммутации, протекающей в полупроводниковых ключах, в питающей потребитель электрической сети возникают высшие гармоники. С целью улучшения гармонического состава применяют моторные дроссели (рис. 6), устанавливаемые между преобразователем и электромотором [18]. Данный тип дросселей выполняет следующие функции:

- подавление высокочастотных гармоник в токе электродвигателя;
- ограничение амплитуды тока короткого замыкания (КЗ);
- снижение скорости нарастания токов КЗ и отсрочка момента достижения максимума (так, при возникновении КЗ на выходе инвертора ток КЗ увеличивается не скачкообразно из-за наличия дополнительной индуктивности в цепи);
- снижение влияния емкостных токов вследствие применения электрических кабелей большой длины;
- снижение количества бросков напряжений на обмотках электрических двигателей, суммарная величина которых превышает амплитуду номинального напряжения.

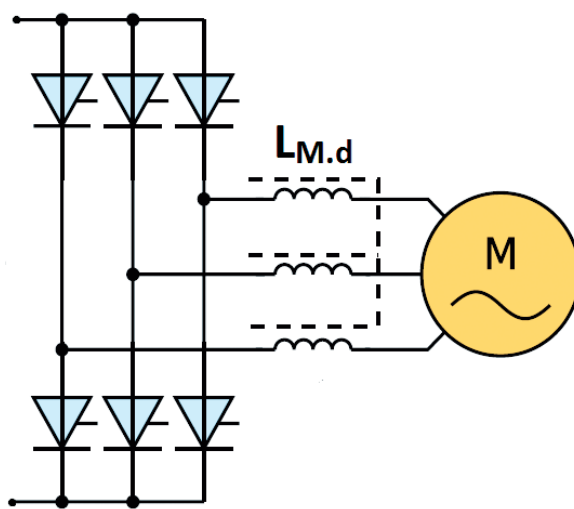


Рис. 6. Схема подключения моторного дросселя

В большинстве случаев применение моторного дросселя является единственным способом осуществления защиты полупроводниковых ключей, входящих в состав инвертора. Осуществлять выбор моторного дросселя необходимо отталкиваясь от предельной величины тока КЗ, который не должен превосходить единичное максимальное пиковое значение.

Синус-фильтры, также применяемые как выходные элементы преобразователей частоты (рис. 7), способны в значительной степени ограничить влияние высших гармоник на работу потребителя, уменьшить дополнительные потери, возникающие в питающем кабеле, а также улучшить электромагнитную совместимость [19].

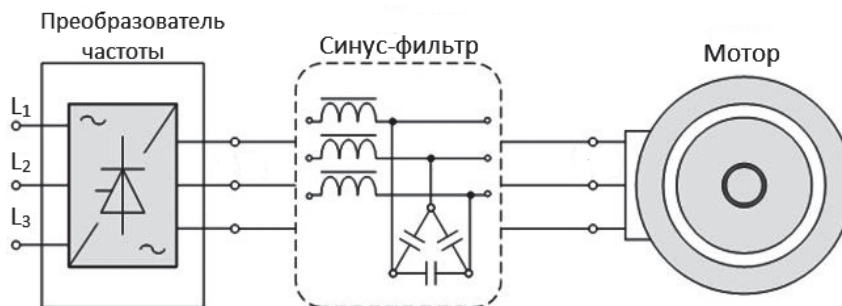


Рис. 7. Схема подключения синус-фильтра

Синус-фильтр представляет собой реактивный фильтр нижних частот, который включает в себя три фазных реактора и три конденсатора, соединенных каждый между двумя фазами. Напряжения, имеющих частоту ниже резонансной частоты f_p , проходят через фильтр без изменений и затухают пропорционально $1/f^2$ при частоте выше резонансной. Обычно параметры элементов синус-фильтров выбираются таким образом, чтобы резонансная частота f_p превосходила частоту основной гармоники напряжения и в то же время была ниже несущей частоты ШИМ-модуляции — $f_{\text{ШИМ}}$. Необходимо также учитывать, что из-за падения напряжения на индуктивности синус-фильтра необходимо увеличивать емкость [20].

При выполнении расчетов параметров элементов синус-фильтров задаются либо индуктивностью, либо емкостью. Выполняя расчет от индуктивности, следует учитывать, что для корректного осуществления функции сглаживания напряжения необходимо соблюдать условие

$$f_{\text{ШИМ}} > 2f_p. \quad (18)$$

Имея значения величин f_p и L -индуктивности синус-фильтра, можно выполнить расчет емкости фильтра:

$$C = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi f_p} \right)^2, \quad (19)$$

где C — значение емкости, принимаемое в случае подключения конденсаторов по схеме «звезда».

В схемах, имеющих подключение конденсаторов «треугольником», т. е. к линейному напряжению, значения емкостей необходимо уменьшить в три раза. Для схем подключения конденсаторов типа «звезда» емкость определяется следующим образом:

$$C = \frac{S}{3} \frac{1}{2\pi f_1 U_1^2} \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}, \quad (20)$$

где S — суммарная мощность нагрузки; U_1 — величина первой гармоники напряжения на емкости синус-фильтра; f_1 — основная частота сети.

При схеме синус-фильтра типа «звезда» индуктивность может быть определена из следующего выражения:

$$L \geq \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2\pi f_p} \right)^2. \quad (21)$$

Однако, из-за сложности проведения математического расчета параметров электрических элементов, входящих в комплекс систем улучшения гармонического состава, подбор осуществляют либо экспериментальными способами, что представляет собой трудоемкий и времязатратный процесс, либо путем моделирования динамических процессов в компьютерной модели, что также вызывает трудности.

С целью улучшения формы графиков тока и напряжения на нагрузке в компьютерную модель (см. рис. 1) были внесены следующие элементы (рис. 8):

- сетевой дроссель;
- сглаживающий фильтр звена постоянного тока индуктивно-емкостного типа Γ ;
- синус-фильтр на выходе со стороны нагрузки.

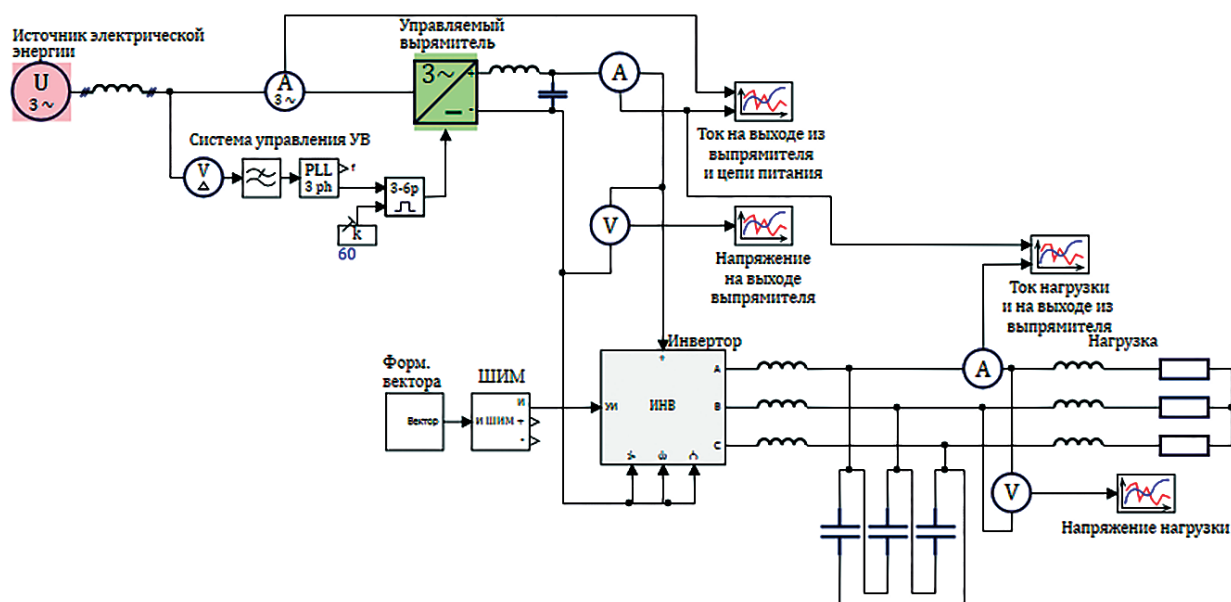


Рис. 8. Компьютерная модель электроэнергетической системы с применением элементов, улучшающих качество электрической энергии

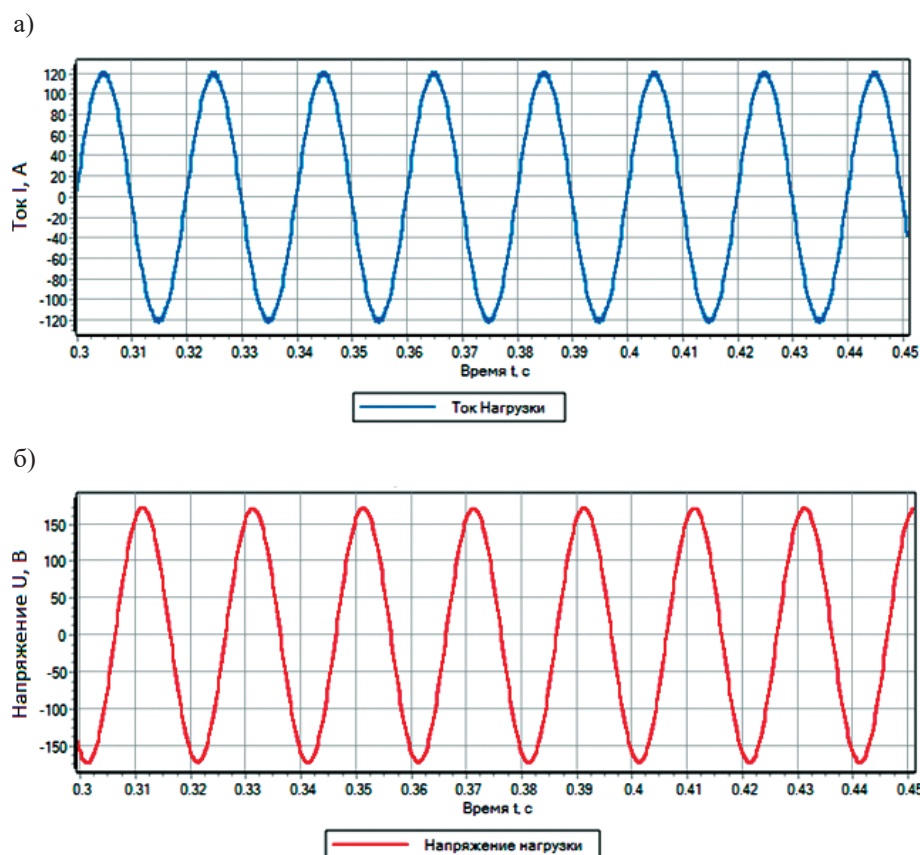


Рис. 9. Графики, полученные при помощи компьютерной модели с применением дросселей и фильтров: а — тока; б — напряжения

Графики (рис. 9) тока и напряжения, полученные в результате моделирования электроэнергетической системы с электрическими фильтрами (см. рис. 8), демонстрируют улучшение качества электрической энергии.

Выводы (Summary)

На основании выполненного в работе исследования можно сделать следующие выводы:

1. Качество электрической энергии так же, как надежность, безопасность и экономичность, представляет собой важное требование, предъявляемое к судовым системам электроснабжения. Исследование компьютерной модели демонстрирует, что предлагаемые электрические элементы такие, как сетевые дроссели, синус-фильтры, фильтры в звене постоянного тока, положительно сказываются на качестве электрической энергии в системах с применением ШИМ-инверторов. Рассмотренные технические решения могут быть реализованы на различных типах судов, тем самым увеличивая эффективность электроэнергетической системы.
2. Правильный подбор параметра индуктивности позволяет добиться наилучших энергосберегающих свойств преобразователя частоты, защитить питающую сеть от высших гармоник, а также обеспечить защиту самого преобразователя электрической энергии от всплесков напряжения и перекосов линейных напряжений.
3. Применение электрических фильтров в звене постоянного тока преобразователя частоты положительно сказывается на гармоническом составе потребляемого тока, ограничивая пиковые и амплитудные значения.
4. Синус-фильтры минимизируют акустический уровень шума, позволяя применять более длинный питающий электрокабель для судовых электроприводов, вследствие чего улучшается качество электроэнергии, уменьшаются нагрузки на изоляцию и потери в обмотках электрических двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litwin W.* Energy efficient and environmentally friendly hybrid conversion of inland passenger vessel / W. Litwin, W. Lesniewski, J. Kowalski // Polish Maritime Research. — 2017. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 77–84. DOI: 10.1515/pomr-2017-0138.
2. *Сеньков А. П.* Судовые единые электроэнергетические системы / А. П. Сеньков, Б. Ф. Дмитриев, А. Н. Калмыков, Л. Н. Токарев // Электротехника. — 2017. — № 5. — С. 8–13.
3. *Романовский В. В.* Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.
4. *Салимова А. К.* Методы повышения качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах / А. К. Салимова, С. С. Исмаилов // Водный транспорт. — 2019. — № 1 (28). — С. 189–198. DOI: 10.33298/2226-8553/2019.1.28.29.
5. *Шереметьев А. Н.* Моделирование гребной электрической установки с преобразователем частоты / А. Н. Шереметьев, А. А. Марченко // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй международной научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2020. — С. 110–114. DOI: 10.24411/9999-038A-2020-00024.
6. *Иванова В. Р.* Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах / В. Р. Иванова, И. Н. Киселев // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. — 2019. — Т. 21. — № 5. — С. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.

7. Sorensen A. J. Toward safer, smarter, and greener ships: Using hybrid marine power plants / A. J. Sorensen, R. Skjetne, T. Bo, M. R. Miyazaki, T. A. Johansen, I. B. Utne, E. Pedersen // IEEE Electrification Magazine. — 2017. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 68–73. DOI: 10.1109/MELE.2017.2718861.
8. Jeon H. Large-Scale Electric Propulsion Systems in Ships Using an Active Front-End Rectifier / H. Jeon, J. Kim, K. Yoon // Journal of Marine Science and Engineering. — 2019. — Vol. 7. — Is. 6. — Pp. 168. DOI: 10.3390/jmse7060168.
9. Стариков А. В. Влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя / А. В. Стариков, С. Л. Лисин, Д. Ю. Рокало // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2019. — № 1 (61). — С. 153–166.
10. Лунев В. Г. Способы компенсации высших гармоник / В. Г. Лунев // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития. Материалы международной научно-практической конференции. — Вологда: Общество с ограниченной ответственностью «Маркер», 2020. — С. 45–46.
11. Касьянов А. М. Применение сетевых дросселей для преобразователей частоты / А. М. Касьянов, Э. М. Сафин // Студенческий вестник. — 2020. — № 19–11 (117). — С. 94–95.
12. Пустоветов М. Ю. Моделирование на ЭВМ влияния сетевого дросселя на характеристики преобразователя частоты / М. Ю. Пустоветов // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. — 2018. — № 1 (30). — С. 74–79.
13. Горячев В. Расчет критической индуктивности дросселя сглаживающего фильтра. Часть 2 / В. Горячев, А. Чуприн, М. Савин // Первая миля. — 2019. — № 8 (85). — С. 62–67. DOI: 10.22184/2070–8963.2019.85.8.62.67.
14. Бладыко Ю. В. Сглаживающие фильтры / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2010. — № 2. — С. 36–40.
15. Конесев С. Г. Методика расчета индуктивно-емкостных преобразователей на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2018. — Т. 22. — № 1 (79). — С. 97–105.
16. Воржев В. Б. Расчет сглаживающих RL-фильтров активно-индуктивных цепей при широтно-импульсном управлении в электрооборудовании автомобилей / В. Б. Воржев, М. А. Сычева, В. И. Купин // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2017. — № 26. — С. 78–83.
17. Вихорев Н. Н. Устройство подавления высших гармоник тока / Н. Н. Вихорев, А. И. Чивенков, Д. А. Алешин, Е. А. Чернов // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 4 (51). — С. 28.
18. Юшков А. Описание и совместное применение сетевых, сглаживающих и моторных дросселей фирмы Elhand Transformatory / А. Юшков // Силовая электроника. — 2008. — № 16. — С. 12–16.
19. Пустоветов М. Ю. О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями / М. Ю. Пустоветов // Электричество. — 2013. — № 5. — С. 41–44.
20. Пустоветов М. Ю. Процедура выбора параметров синус-фильтра при повышенной частоте напряжения / М. Ю. Пустоветов // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. — 2019. — Т. 1. — № 1 (6). — С. 146–152.

REFERENCES

1. Litwin, Wojciech, Wojciech Leśniewski, and Jakub Kowalski. “Energy efficient and environmentally friendly hybrid conversion of inland passenger vessel.” *Polish Maritime Research* 24.4 (2017): 77–84. DOI: 10.1515/pomr-2017-0138.
2. Sen'kov, A.P., B. F. Dmitriev, A. N. Kalmykov, and L. N. Tokarev. “Ship unified electric-power systems.” *Russian Electrical Engineering* 88.5 (2017): 253–258. DOI: 10.3103/S1068371217050108.
3. Romanovski, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. “Hybrid electricity systems of vessels with dc-grid system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.3 (2020): 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

4. Salimova, A. K., and S. C. Ismailov. "Methods increased quality electric energy in ship electric energy systems." *Vodnii transport* 1(28) (2019): 189–198.
5. Sheremetev, A. N., and A. A. Marchenko. "Modelling of the rowing electrical unit with the frequency converter." *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: Materialy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhicheskoi konferentsii*. Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2020. 110–114. DOI: 10.24411/9999-038A-2020-00024.
6. Ivanova, V. R., and I. N. Kiselev. "Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes." *Power engineering: research, equipment, technology* 21.5 (2019): 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
7. Sorensen, Asgeir J., Roger Skjetne, Torstein Bo, Michel R. Miyazaki, Tor Arne Johansen, Ingrid B. Utne, and Eilif Pedersen. "Toward safer, smarter, and greener ships: Using hybrid marine power plants." *IEEE Electrification Magazine* 5.3 (2017): 68–73. DOI: 10.1109/MELE.2017.2718861.
8. Jeon, Hyeonmin, Jongsu Kim, and Kyoungkuk Yoon. "Large-scale electric propulsion systems in ships using an active front-end rectifier." *Journal of Marine Science and Engineering* 7.6 (2019): 168. DOI: 10.3390/jmse7060168.
9. Starikov, Alexander V., Sergey L. Lisin, and Daniil Yu. Rokalo. "Influence of the pulse-width modulation on the harmonic composition of the output voltage of a frequency converter." *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series* 1(61) (2019): 153–166.
10. Lunev, V. G. "Sposoby kompensatsii vysshikh harmonik." *Nauka segodnya: global'nye vyzovy i mekhanizmy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vologda: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Marker", 2020. 45–46.
11. Kas'yanov, A. M., and E. M. Safin. "Primenenie setevykh drosslei dlya preobrazovatelei chastoty." *Studencheskii vestnik* 19–11(117) (2020): 94–95.
12. Pustovetov, Mikhail Yu. "Simulating of the line reactor influence to frequency converter characteristics." *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhema* 1(30) (2018): 74–79.
13. Goryachev, V., A. Chuprin, and M. Savin. "Calculation of critical induction of a smoothing filter inductor. Part 2." *Last Mile* 8(85) (2019): 62–67. DOI: 10.22184/2070-8963.2019.85.8.62.67
14. Bladyko, Y. V. "Rectifier filters." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 2 (2010): 36–40.
15. Konesev, Sergey Gennadevich, and Regina Tagirovna Khazieva. "Method of calculation of inductive-capacitive converters based on multifunctional integrated electromagnetic components." *Vestnik USATU* 22.1(79) (2018): 97–105.
16. Vorzhev, V. B., M. A. Sychova, and V. I. Kupin. "Calculation of low-pass rl filters in active-inductive circuits used in automotive electronics controlled by pulse-width modulation." *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* 26 (2017): 78–83.
17. Vikhorev, N. N., A. I. Chivenkov, D. A. Aleshin, and E. A. Chernov. "Harmonic current suppression device." *Engineering journal of Don* 4(51) (2018): 28.
18. Yushkov, A. "Opisanie i sovmestnoe primeneniye setevykh, sglazhivayushchikh i motornykh drosslei firmy Elhand Transformatory." *Silovaya elektronika* 16 (2008): 12–16.
19. Pustovetov, M. Yu. "O parametrah fil'trov dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s asinkhronnymi dvigatelyami." *Elektrichestvo* 5 (2013): 41–44.
20. Pustovetov, Mikhail. "The procedure of sine-wave filter parameters selection in case of increased frequency of voltage." *Contemporary innovation technique of the engineering personnel training for the mining and transport industry* 1.1(6) (2019): 146–152.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovskiy, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru

Бежик Артем Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Bezhik, Artem S. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovskiy, Victor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 25 января 2021 г.
Received: January 25, 2021.*