

Научная статья
УДК 621.314:629.5.03
DOI 10.46845/1997-3071-2023-68-97-109

**Исследование возможности модернизации судовой электростанции судов
инострannого производства в условиях импортозамещения**

Антон Борисович Вольский¹, Кирилл Андреевич Новоселов²

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹koha73@yandex.ru,

²kirill-n1996@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4206-6150>

Аннотация. Объектом исследования является промежуточный преобразователь частоты и напряжения, требуемый для получения электроэнергии необходимых параметров, чтобы питать судовые потребители. Цель – усовершенствовать систему питания с берега путем установки современного полупроводникового преобразователя для адаптации параметров электросети.

В настоящее время существует проблема приведения к соответствию параметров судовой электрической сети судов иностранного производства стандартам отечественной системы электроснабжения при питании с берега. На судне использована система преобразования двигатель-генератор, обладающая рядом существенных недостатков. Нами рассмотрена возможность ее замены с применением статического преобразователя частоты и напряжения, имеющего ряд преимуществ по сравнению с существующей схемой электроснабжения судна с берега.

В процессе работы изучался алгоритм питания потребителей как от судовых источников электроэнергии, так и от береговых сетей, проводился анализ схем преобразования частоты и напряжения исходного преобразователя и предлагаемого взамен, рассматривались конструктивные исполнения преобразователей, выявлялись их достоинства и недостатки.

В результате исследования была подчеркнута важность соблюдения стандартов сети при питании судовых потребителей, предложен современный преобразователь параметров сети на базе статического преобразователя частоты и напряжения, разработана схема соединения преобразователя с электрораспределительной системой судна, представлены экономические и экологические обоснования проекта.

По итогам проведенного моделирования сделан вывод, что для преобразования параметров электроэнергии, таких как напряжение и частота, чтобы питать потребителей, требующих других величин, а также в качестве промежуточного пункта в процессе электроснабжения судна с берега может применяться статический преобразователь частоты и напряжения.

Ключевые слова: судовая электростанция, статический преобразователь частоты и напряжения, модернизация, питание с берега

Для цитирования: Вольский А. Б., Новоселов К. А. Исследование возможности модернизации судовой электростанции судов иностранного производства в условиях импортозамещения // Известия КГТУ. 2023. № 68. С. 97–109. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-97-109.

Original article

Study of the possibility of modernization of the ship power plant of foreign-made vessels in the conditions of import substitution

Anton B. Volskiy¹, Kirill A. Novoselov²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹koha73@yandex.ru,

²kirill-n1996@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4206-6150>

Abstract. The object of the study is an intermediate frequency and voltage converter, which is required to obtain electricity of the necessary parameters to power the ship's consumers. The goal is to improve the power supply system from the shore by installing a modern semiconductor converter to adapt the parameters of the power grid.

Currently, there is a problem of adapting the parameters of the ship's electrical network of foreign-made vessels to the standards of the domestic power supply system when powered from shore. The ship uses an engine-generator conversion system, which has a number of significant drawbacks. The paper considered the possibility of its replacement using a static frequency and voltage converter, which has a number of advantages over the existing scheme of power supply of the vessel from the shore.

In the process of work, the algorithm of power supply to consumers from both ship-based power sources and coastal networks has been investigated, frequency and voltage conversion schemes of the original converter and the one proposed in return have been analyzed, the designs of the converters have also been considered, advantages and disadvantages have been identified.

As a result of the study, the importance of observing network standards when powering ship consumers is emphasized, a modern converter of network parameters based on a static frequency and voltage converter has been proposed, a circuit for connecting the converter to the ship's electrical distribution system has been developed, economic and environmental justifications of the project have been presented.

As a result of the conducted research, a conclusion has been drawn that a static frequency and voltage converter can be used to convert electricity parameters, such as voltage and frequency, to power consumers requiring other values, as well as an intermediate point in the process of supplying electricity to a vessel from shore.

Keywords: ship power plant, static frequency and voltage converter, modernization, power supply from shore

For citation: Volskiy A. B., Novoselov K. A. Study of the possibility of modernization of the Ship power plant of foreign-made vessels in the conditions of import substitution. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (68): 97–109. (In Russ). DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-97-109.

ВВЕДЕНИЕ

Судовые электрические системы питания различаются параметрами судовой сети – напряжением, частотой и родом тока. Это зависит от принятых стандартов напряжения и частоты страны-производителя судна.

Российский и европейский стандарты едины, а именно: 220–240 В, 50 Гц – однофазная сеть и 380 В, 50 Гц – трехфазная сеть. Американский стандарт – 110–127 В, 60 Гц – однофазная сеть и 440–480 В, 60 Гц – трехфазная сеть. Основной частотой переменного тока на судах отечественного флота принята частота 50 Гц, а на судах иностранной постройки – 60 Гц. Суда работают по всему миру, и вследствие разницы стандартов электросети, в частности, при питании судна от береговой подстанции во время стоянки в порту, возникает необходимость установки промежуточных преобразователей.

Преобразователь частоты позволяет регулировать величину и частоту напряжения питания, которое подается на судовое электрооборудование [1]. На судах находятся дизель-генераторные агрегаты с определенными заданными параметрами напряжения. Потребность в преобразователе частоты возникает при необходимости произвести настройку судового электрооборудования или использовании специфического потребителя, который нуждается в отличных от стандартных параметрах питающего напряжения, а также в подаче питания с берега [2, 3]. В [4] отмечается, что необходима борьба с высшими гармониками, которые негативно влияют на качество электрической энергии. Следует учитывать разнообразные факторы: от параметров генераторов и их вероятной нагрузки до частоты и коэффициента широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и длины кабелей, однако крайне важно еще в начале эксплуатации или постройки судна учесть все факторы и применять, в том числе, преобразователи частоты для надежного функционирования и эксплуатации судового электрооборудования.

Вышеперечисленные исследования показывают основное применение статических преобразователей частоты и напряжения (СПЧН) как средств управления электроприводами, однако в работах [5, 6] рассмотрена возможность использования СПЧН в качестве питания гребного электродвигателя, когда мощность потребителя близка к мощности судовой электростанции, что дает нам понимание возможности использования СПЧН для питания мощных устройств. Вследствие вышесказанного, цель работы – усовершенствовать систему питания с берега путем установки современного полупроводникового преобразователя для адаптации параметров электросети.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Модернизация судовой электростанции при питании с берега

Азимутальный буксир "Шторм", построенный в 1982 г. в США, предназначен для буксировки самоходных и несамоходных судов внутрипортовой акватории и за ее пределами [7]. Он обеспечивает их сопровождение через каналы, а также производит швартовные операции крупногабаритных судов. Напряжение судовой сети находится в пределах 440–460 В при переменном трехфазном токе с частотой 60 Гц и переменном однофазном токе – 120 В. Также приняты другие

номинальные напряжения: 120 и 208 В (при схеме соединения "звезда") и 120 и 240 В (при схеме соединения "треугольник"). В состав преобразователей входят понижающие трансформаторы напряжения, автотрансформатор.

Береговое питание осуществляется посредством электромашинного преобразователя по схеме "двигатель-генератор" ввиду несовместимости стандартов судовой электросети с электросетями Российской Федерации. Структурная схема судовой электростанции представлена на рис. 1.

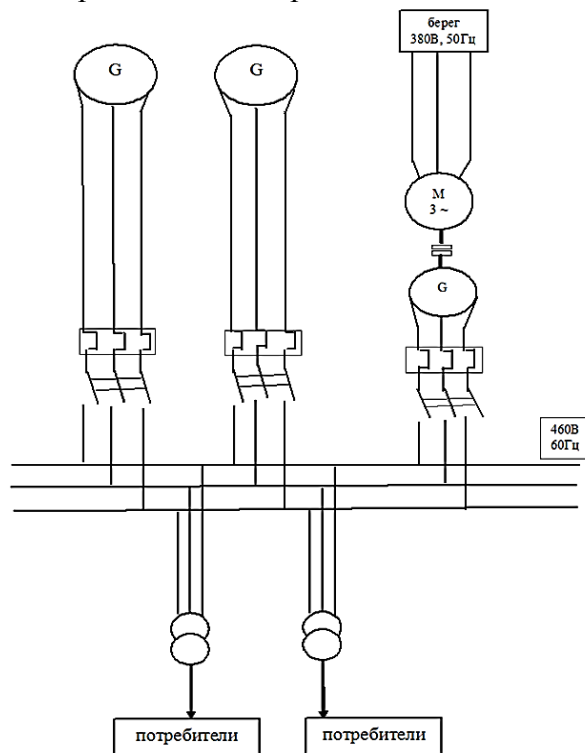


Рис. 1. Структурная схема судовой электростанции
Fig. 1. Structural diagram of the ship power plant

Исходный преобразователь по конструкции состоит из двух машин: асинхронного трехфазного электродвигателя и синхронного трехфазного генератора, соединенных между собой ременной передачей [8, 9]. К достоинствам таких преобразователей относятся независимость параметров преобразуемой и получаемой энергии и возможность совмещать разные типы и серии электрических машин для соответствующих нужд [10–12]. Ременная передача обеспечивает бесшумность работы по сравнению с другими видами передач. Существенными недостатками таких преобразователей являются: низкий КПД, $\eta = \eta_{\text{двиг}} * \eta_{\text{ген}}$; регулярность и сложность обслуживания, что особенно затруднено в современных условиях; существенный уровень вибрации и шума; громоздкость конструкции; износ ремня, вследствие чего снижается надежность преобразователя в целом.

В качестве стабилизированного источника переменного напряжения для объектов, требующих определенных значений параметров электросети, можно использовать СПЧН [13, 14], его структурная схема представлена на рис. 2. Он гарантирует фактически синусоидальное напряжение при нагрузке, в которой линейные элементы зависят от тока или напряжения.

Кроме того, СПЧН обладают высокой степенью точности поддерживать напряжение и частоту и значительно превосходят по этим показателям электромашинные преобразователи [15]. При возникновении нештатной ситуации или короткого замыкания обнуление напряжения происходит незамедлительно, без перенапряжений. Тем самым обеспечивается возможность многократного включения и выключения преобразователя во время работы.

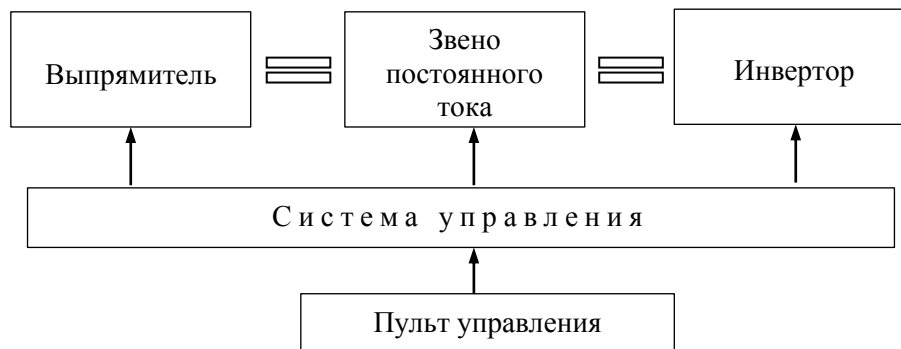


Рис. 2. Структурная схема СПЧН
Fig. 2. Block diagram of the SFVC

Инвертор СПЧН построен на базе высокоскоростных IGBT-транзисторов, которые предусматривают высокочастотную широтно-импульсную регулировку выходного напряжения. В свою очередь, каждый из них состоит из двух транзисторов – биполярного и полевого, заключенных в совместную полупроводниковую структуру. Биполярный транзистор формирует силовой канал, а полевой – канал управления. Силовой выполнен в виде сдвоенного модуля, представляющего собой последовательное соединение двух транзисторов. IGBT-транзисторы работают по принципу открытия и закрытия ключа. Временем нахождения в открытом или закрытом состоянии можно управлять, поэтому частота выходного напряжения формируется исходя из продолжительности нахождения транзисторов в той или иной позиции. Вместе с тем амплитуду выходного напряжения определяет ШИМ. Она же отвечает за формирование синусоидальной формы выходного напряжения. Чем дольше ключ находится в открытом состоянии, тем выше уровень выходного напряжения. Встроенный процессор определяет время нахождения ключа в открытом состоянии.

Регулирование на основе ШИМ дает много преимуществ, а именно: контроль синусоидального напряжения или тока высокого качества; большой диапазон настройки уровня выходного напряжения (от 5 до 100 %) с любой установленной скоростью; регулировка частоты выходного напряжения в широких пределах (от 49 до 120 Гц); возможность поддерживать синусоидальное напряжение или ток при работе на нелинейной нагрузке; скоростное ограничение токов и напряжений в случае аварийного режима; высокий КПД; низкий уровень шума; простота в обслуживании; при выходе из строя составного элемента блок заменяется целиком; менее дорогостоящий ремонт по сравнению с электромашинными преобразователями.

Расчет мощности судовой электростанции в режиме "стоянка в порту" произведен табличным способом. Результаты расчета подтвердили требуемую

мощность $S_{расч} = 34,6$ кВт. По результатам расчета подобран СПЧН отечественного производства [16] с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики преобразователя

Table 1. Characteristics of the converter

Параметр	Характеристика
Номинальное напряжение питающей сети	380 В
Род тока питающей сети	Переменный
Число фаз питающей сети	3
Частота напряжения питающей сети, Гц	50
Номинальное выходное напряжение, В	20–2800
Род тока выходного напряжения	Переменный
Число фаз выходного напряжения	3
Частота выходного напряжения, Гц	49–120
Номинальная выходная мощность для переменного тока, кВА/кВт	250/50
Перегрузочная способность, %	5
КПД, %	97
Способ охлаждения	Принудительно воздушный
Режим работы	Длительный

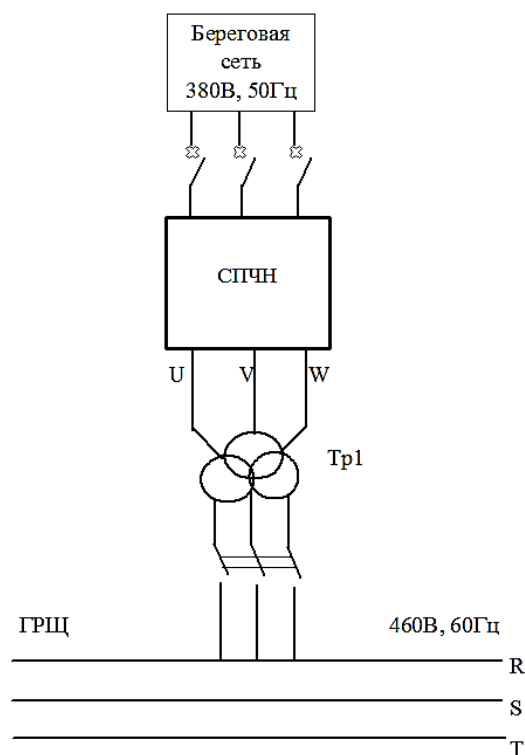


Рис. 3. Структурная схема судовой электростанции с применением СПЧН

Fig. 3. Structural diagram of a ship power plant with the use of SFVC

Разработанная модернизированная схема судовой электростанции при питании судна с берега представлена на рис. 3. Для точного согласования выходного

напряжения с требуемым напряжением нагрузки в схеме использован согласующий трансформатор Тр1. Варьируя схемы включения обмоток трансформатора, можно изменять выходное напряжение, тем самым обеспечивая оптимальное согласование по мощности источника с нагрузкой, а также регулировать выходное напряжение, согласовывая с напряжением, требуемым нагрузкой. Это позволит обеспечить оптимальную загрузку по току и напряжению СПЧН [16].

Сравнительные характеристики показателей эффективности применения электромашинного преобразователя и СПЧН приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики показателей эффективности применения электромашинного преобразователя и СПЧН

Table 2. Comparative characteristics of the performance indicators of the use of an electric machine converter and SFVC

Характеристики	Электромашинный преобразователь	СПЧН
Количество включений	Ограничено	Не ограничено
КПД	81 %	97 %
Перегрузочная мощность k_m	2,3 %	5 %
Ремонтопригодность	Невысокая	Высокая

2. Экономическое обоснование проекта

Модернизация какого-либо оборудования или внедрение нового технического решения в работу объекта сопровождается экономическими затратами, поэтому важная часть процесса совершенствования – экономическая эффективность. Проведем ее расчет, и выделим некоторые выгоды в области экономической производительности. Главными показателями эффективности настоящего проекта являются эффективность капиталовложения, эксплуатации электрооборудования и срок окупаемости. Значительная часть потребляемой электроэнергии расходуется на то, чтобы обеспечить вращение электродвигателя. В этом отношении применение преобразователя частоты, построенного на полупроводниковых элементах, рационально, поскольку позволяет экономить на потреблении электричества с сохранением своих функций. Немаловажным является тот факт, что преобразование электроэнергии нужных параметров для потребителей происходит с минимальными потерями. Включение в сеть асинхронных электродвигателей характеризуется большими бросками пусковых токов. Это негативно влияет на работу электродвигателя, чревато дополнительной нагрузкой и вероятностью перегрузки, что накладывает ограничение на количество включений и отключений. СПЧН можно включать и отключать неограниченное число раз. Изоляция электродвигателей – чувствительное место. Материалы, из которых она сделана, имеют разную сопротивляемость к нагреву. От этого зависят срок службы, надежность, технико-экономические характеристики электродвигателя. КПД электромашинного преобразователя, поскольку он состоит из двух агрегатов, определяет произведение КПД электродвигателя и генератора:

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_g = 0,86 \cdot 0,94 = 0,81 = 81 \%. \quad (1)$$

КПД СПЧН равен 97 %. Это значит, что почти вся электроэнергия, получаемая от сети, передается по назначению. Электромашинный преобразователь

ограничивает количество подключаемых потребителей, поскольку электродвигатель и генератор рассчитаны на определенную мощность. СПЧН могут быть использованы для разных целей, во многих областях, поэтому предусмотрен широкий диапазон мощностей, выходных напряжений и частот для любых нужд.

Перегрузочная способность электродвигателя составляет, %:

$$k_m = \frac{M_m}{M_n} = \frac{445,25}{193,6} = 2,3. \quad (2)$$

Перегрузочная способность СПЧН – 5 %. Электромашинный преобразователь требует регулярного технического обслуживания ввиду наличия вращающихся частей. Уход и смазка подшипников электродвигателя, существенные трудности в обслуживании бесщеточного генератора связаны невозможностью уследить за состоянием элемента ротора. Это требует материальных вложений как на обслуживание, так и на ремонт. Для передачи вращающегося момента используется ремень. Он довольно быстро изнашивается, что тоже требует дополнительных затрат. Благодаря блоковому строению СПЧН дает возможность быстро заменить вышедший из строя компонент. Он обладает большей ремонтпригодностью в отличие от электромашинных преобразователей, что тоже сказывается на капитальных вложениях. Работа СПЧН построена по программируемой схеме, вероятность отказов минимальна.

Статический преобразователь дает экономичное разрешение проблемы несоответствия частот или напряжений при подключении судна к любой сети. СПЧН занимает малую площадь, подойдет для размещения вблизи распределительных устройств и трансформаторов. Он повышает качество подводимой электроэнергии, используя функцию увеличения коэффициента мощности, и стабилизирует напряжение и частоту. Полупроводниковые преобразователи частоты не нуждаются в техническом обслуживании, изнашивания частей не происходит, а значит, потребуются меньше вложений. Экономия энергии осуществляется за счет возможности регулирования потребляемой мощности в зависимости от действительной нагрузки. Уместна установка частотного преобразователя на каждом судне. Разница в стандартах, по крайней мере, частот, уже создает некоторые препятствия для электроснабжения судов от береговых сетей (табл. 3).

Таблица 3. Стоимость основных материалов

Table 3. Cost of basic materials

Наименование оборудования	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
Автоматические выключатели	3	250	750
Клеммники	30	18	540
Кабель 1,5 м	6	300	1800
Крепления для кабеля	30	75	2250
Лента изоляционная	1	150	150
Статический преобразователь частоты 50 кВт	1	500000	500000
Согласующий трансформатор	1	180000	180000
Транспортные расходы	—	—	4000
Итого:			689500

Стоимость покупных изделий составила, руб.:

$$S_m = 689500.$$

Рассчитаем стоимость установки и настройки оборудования (табл. 4).

Таблица 4. Стоимость установки и настройки оборудования

Table 4. Cost of installation and configuration of equipment

Наименование выполняемых работ	Трудоемкость, ч	Часовая ставка руб./ч	Сумма заработной платы, руб.
Сборка узлов	3	150	450
Демонтаж старого оборудования	5	230	1150
Установка нового оборудования	1,5	80	120
Настройка и испытания	1	80	80
Итого	—	—	1800

Стоимость установки и настройки оборудования составила, руб.:

$$S_{уст} = 1800.$$

Определим суммарные затраты на изготовление модернизированного оборудования.

$$S = S_m + S_{уст}, \quad (3)$$

где — стоимость основных материалов, руб.; $S_{уст}$ — стоимость установки и настройки оборудования, руб.

Тогда

$$S = 689500 + 1800 = 691300.$$

Определим экономию производственных средств при его эксплуатации.

Посчитаем годовую экономию электроэнергии по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = (P_1 - P_2)Q_1 \cdot Q_2, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_1$ — годовая экономия электроэнергии; P_1 — часовой расход до модернизации, кВт; P_2 — часовой расход после модернизации, кВт; Q_1 — годовой фонд рабочего времени, ч; Q_2 — цена одного кВт, руб.

Тогда годовая экономия электроэнергии равна, руб.:

$$\mathcal{E}_1 = (32 - 31) \cdot 500 \cdot 10 = 5000.$$

Таким образом, общая годовая экономия составила 5000 руб.

Согласно общей практике срок окупаемости частотных преобразователей составляет от 3 мес. до 3 лет.

3. Экологическая оценка

Модернизация производится путем замены оборудования на новое, а именно, демонтаж старого и монтаж нового, старое оборудование с элементами цепи подлежит перепродаже с учетом многократного использования. Все оставшиеся материалы подлежат переработке на вторичное сырье с целью экономии природных ресурсов.

Внедрение современных технологий должно отвечать требованиям в области охраны окружающей среды, чтобы не допустить негативного влияния на нее. Шум оказывает влияние на окружающую среду и жизнедеятельность человека. Порогом отрицательного влияния на слуховой орган человека является шум электродвигателя, оцениваемый в 80 дБ.

Одним из факторов, влияющих на экологию, является вибрация, в частности, такие ее источники, как генератор и электродвигатель. У генератора ее величина составляет 30 ГцА, а у электродвигателя в 3–5 раз больше. Вибрация также оказывает воздействие на детали и механизмы, повышая регулярность технического обслуживания. У полупроводниковых преобразователей частоты данные показатели ниже. Материалы, которые используются в составе частотного преобразователя, не содержат вредных веществ. Негативного воздействия на окружающую среду не оказывается как во время эксплуатации, так и после ее завершения. Вредных выбросов в атмосферу не зафиксировано.

Модернизацию судовой электростанции путем установки преобразователя частоты, построенного по современным технологиям, можно произвести непосредственно у пирса, при стоянке в порту, так как не потребуются применения специализированного оборудования, сложных монтажных и демонтажных работ, способных загрязнить водную среду.

Количество судов стремительно растет, и в результате возникают все большие риски загрязнения как морской среды, так и окружающей. Поэтому в 1973 г. была принята Конвенция по предотвращению загрязнения окружающей среды с судов – МАРПОЛ 73/78. Это одна из самых важных международных конвенций, цель которой – предотвратить загрязнение с судов топливом, маслом, химикатами, вредными веществами в упакованном виде, сточными водами и мусором. В целях защиты окружающей среды каждое судно оборудуется очистной установкой. Она работает непрерывно во время стоянки судна в порту. Кроме того, суда оснащаются оборудованием, которое ограничивает содержание масел в сбрасываемых водах [17]. Во время их эксплуатации совершается выброс выхлопных газов от работающих энергетических, котельных и упомянутых выше очистных установок. В связи с этим при модернизации важно учесть возможный риск загрязнения как морской, так и окружающей среды в целом.

Данный проект отвечает всем требованиям охраны окружающей среды, не оказывает негативного влияния на экологическую обстановку в Мировом океане, т. е. способствует благоприятному воздействию на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напряжение, частота и род тока являются основными параметрами СЭЭС. Именно они характеризуют надежность и экономичность работы и условия эксплуатации судового электрооборудования, от них зависят особенности исполнения СЭЭС, наконец, они определяют стандарт судовой сети. Использование преобразователей частоты дало возможность получить экономическую эффективность, которая достигается за счет сокращения потребления электроэнергии, расходов на ремонт, а также других производственных издержек, высокий КПД. Внедрение преобразователей частоты, построенных на полупроводниковых элементах, нашло широкое применение на судах.

Использование статического преобразователя дает экономичное разрешение проблемы несоответствия частот или напряжений при подключении судна к любой сети. СПЧН занимает малую площадь, подойдет для размещения вблизи распределительных устройств и трансформаторов. Он повышает качество подводимой электроэнергии, применяя функцию увеличения коэффициента мощности, и стабилизирует напряжение и частоту. Полупроводниковые преобразователи ча-

стоты не нуждаются в техническом обслуживании, изнашивания частей не происходит, а значит, понадобится меньше вложений. Экономия энергии происходит за счет возможности регулирования потребляемой мощности в зависимости от действительной нагрузки.

В ходе выполнения исследования была подтверждена необходимость наличия промежуточного преобразователя при электроснабжении судна от береговой сети; предложен современный преобразователь частоты и напряжения взамен исходного; обоснована позиция выбора в пользу отечественного преобразователя; описаны технические характеристики и достоинства СПЧН; проведен анализ схем преобразования; разработана и описана схема сопряжения судовой электростанции с электросетями Российской Федерации; дана экономическая и экологическая оценки.

Список источников

1. Шавелкин А. А., Писанюк В. В., Мирошник Д. Н. Использование автономного инвертора тока в режиме источника синусоидального напряжения // Вестник Харьковского политехнического института. 2012. № 28. С. 138–143.
2. Клевцов А. В. Преобразователи частоты для электропривода переменного тока. Москва: ДМК-Пресс, 2010. 224 с.
3. Применение преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования / Н. Г. Романенко [и др.] // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 1. С. 77–84.
4. Кахайли Д. М., Ясаков Г. С., Яковлев Д. Б. Обеспечение качества электроэнергии в единых корабельных электроэнергетических системах при наличии мощных статических преобразователей // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. 2015. № 4. С. 56–60.
5. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя / Г. М. Мустафа [и др.] // Электротехника. 2014. № 1. С. 46–53.
6. Романенко Н. Г., Головкин С. В., Жуманазаров М. П. Исследование свойств преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2017. № 1. С. 76–81.
7. Буксирные суда (проектирование и конструкция) / Б. В. Богданов, А. В. Слуцкий, М. Г. Шмаков, К. Д. Васильев [и др.]. Ленинград: Судостроение, 1974. 280 с.
8. Верескун В. И., Сафонов А. С. Электротехника и электрооборудование судов. Ленинград: Судостроение, 1987. 280 с.
9. Баранников В. К. Эксплуатация электрооборудования рыбопромысловых судов. Москва: МОРКНИГА, 2013. 496 с.
10. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Санкт-Петербург: Судостроение, 2005. 528 с.
11. Мезин Е. К. Судовые электрические машины. Ленинград: Судостроение, 1985. 320 с.
12. Справочник судового электротехника. Т. 2. Судовое электрооборудование / под ред. Г. И. Китаенко. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Судостроение, 1980. 624 с.

13. Тумаева Е. В. Преобразователи частоты. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт Казанского национального исследовательского технологического университета, 2015. 28 с.
14. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
15. Преобразователи частоты URL: <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli> (дата обращения: 10.11.2022).
16. Статический преобразователь частоты и напряжения. URL: <http://lm-inverter.ru/ru/produksiya-i-razrabotki/katalog/staticheskie-preobrazovateli-chastoty/spchn-250/> (дата обращения: 11.11.2022).
17. РМРС, Правила классификации и постройки морских судов, часть XI "Электрическое оборудование" / под ред. С. А. Кротт. URL: <https://rs-class.org/upload/iblock/592/592a71ac86ed683ea98c2f8717f1f057.pdf> (дата обращения: 12.11.2022).

References

1. Shavelkin A. A. Ispol'zovanie avtonomnogo invertora toka v rezhime istochnika sinusoidal'nogo napryazheniya [Using an autonomous current inverter in the mode of a sinusoidal voltage source]. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta*, 2012, no. 28, pp. 138–143. (In Russ.).
2. Klevtsov A. V. *Preobrazovateli chastoty dlya elektroprivoda peremennogo toka* [Frequency converters for AC electric drive]. Moscow, DMK-Press Publ., 2010. 224 p. (In Russ.).
3. Romanenko N. G. Primenenie preobrazovatelya chastoty v kachestve istochnika pitaniya sudovogo elektrooborudovaniya [Application of a frequency converter as a power source for marine electrical equipment]. Astrakhan', *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 1, pp. 77–84. (In Russ.).
4. Kakhayli D. M. Obespechenie kachestva elektroenergii v edinykh korabel'nykh elektroenergeticheskikh sistemakh pri nalichii moshchnykh staticheskikh preobrazovateley [Ensuring the quality of electricity in unified shipboard electric power systems in the presence of powerful static converters]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 56–60. (In Russ.).
5. Mustafa G. M. [et al.]. Preobrazovatel' chastoty dlya grebnogo elektrodvigatelya [Frequency converter for a rowing electric motor]. Moscow, *Elektrotekhnika*, 2014, no. 1, pp. 46–53. (In Russ.).
6. Romanenko N. G. Issledovanie svoystv preobrazovatelya chastoty v kachestve istochnika pitaniya sudovogo elektrooborudovaniya [Study of the properties of a frequency converter as a power source for marine electrical equipment]. Astrakhan', *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2017, no. 1, pp. 76–81. (In Russ.).
7. Bogdanov B. V., Slutskiy A. V., Shmakov M. G., Vasil'ev K. D., Sorokin D. Kh. *Buksirnye suda (proektirovanie i konstruktziya)* [Tugboats (design and construction)]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1974, 280 p. (In Russ.).
8. Vereskun V. I., Safonov A. S. *Elektrotekhnika i elektrooborudovanie sudov* [Electrical engineering and electrical equipment of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987, 280 p. (In Russ.).

9. Barannikov V. K. *Ekspluatatsiya elektrooborudovaniya rybopromyslovykh sudov* [Operation of electrical equipment of fishing vessels]. Moscow, MORKNIGA Publ., 2013, 496 p. (In Russ.).
10. Baranov A. P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy* [Ship automated electric power systems]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005, 528 p. (In Russ.).
11. Mezin E. K. *Sudovye elektricheskie mashiny* [Marine electric machines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985, 320 p. (In Russ.).
12. *Spravochnik sudovogo elektrotekhnika* [Handbook of ship electrical engineering]. Kitaenko G. I. (editor). Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980, vol. 2, 624 p. (In Russ.).
13. Tumaeva E. V. *Preobrazovateli chastoty* [Frequency converters studies]. Nizhnekamsk, Nizhnekamskiy khimiko-tekhnologicheskii institut Kazanskogo natsional'nogo issledovatel'skogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, 28 p. (In Russ.).
14. Gel'man M. V., Dudkin M. M., Preobrazhenskiy K. A. *Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie* [Transformative technique: a textbook]. Chelyabinsk, Izdatel'skiy tsentr YUUrGU Publ., 2009, 425 p. (In Russ.).
15. *Preobrazovateli chastoty* [Frequency converters]. Available at: <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli> (Accessed 10 November 2022). (In Russ.).
16. *Sticheskiy preobrazovatel' chastoty i napryazheniya* [Static frequency and voltage converter]. Available at: <http://lm-inverter.ru/ru/produkcija-i-razrabotki/katalog/staticheskie-preobrazovateli-chastoty/spchn-250/> (Accessed 11 November 2022). (In Russ.).
17. *RMRS, Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov, chast' XI "Elektricheskoe oborudovanie"* [RMRS, Rules of classification and construction of marine vessels, Part XI "Electrical equipment"]. Krott S. A. (editor). Available at: <https://rs-class.org/upload/iblock/592/592a71ac86ed683ea98c2f8717f1f057.pdf> (Accessed 12 November 2022). (In Russ.).

Информация об авторах

А. Б. Вольский – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов

К. А. Новоселов – преподаватель кафедры электрооборудования и автоматики судов

Information about the authors

A. B. Volskiy – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation

K. A. Novoselov – Lecturer of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation

Статья поступила в редакцию 30.10.2022; одобрена после рецензирования 10.11.2022; принята к публикации 08.12.2022.

The article was submitted 30.10.2022; approved after reviewing 10.11.2022; accepted for publication 08.12.2022.