

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142  
УДК 629.5.028-83  
EDN: GICGBT

А.Б. Вольский, К.А. Новоселов   
Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БРАШПИЛЯ

**Объект и цель научной работы.** Объект исследования – электропривод брашпиля. Цель – усовершенствование электропривода брашпиля путем изменения системы управления.

**Материалы и методы.** Якорно-швартовные устройства, к которым относится и брашпиль, являются важными элементами в обеспечении безопасности судна, что обуславливает актуальность темы исследования. Брашпили с релейно-контакторными системами управления устаревают, в результате их приходится часто ремонтировать, что ведет к снижению коэффициента технической готовности и увеличивает экономические потери от простоя судна. В статье рассмотрена возможность замены релейно-контакторной системы управления, используемой электроприводом брашпиля, на частотно-регулируемую схему управления, т.к. последняя имеет ряд преимуществ, в частности более высокую надежность и возможность изменения механических характеристик.

**Основные результаты.** В процессе проведения исследования изучался алгоритм работы различных схем управления электроприводом, проводился анализ нагрузочных характеристик и режимов работы электропривода. Выявлено, что несмотря на низкую стоимость и ремонтпригодность релейно-контакторные системы имеют ряд существенных недостатков: высокие пусковые токи; повышенные динамические нагрузки на электродвигатель и механизмы электропривода; отсутствие возможности плавного управления скоростью вращения двигателя; низкая надежность. Именно поэтому в модернизируемой схеме в преобразователе частоты был использован автономный инвертор напряжения, построенный на базе IGBT-транзисторов, что дает множество преимуществ.

**Заключение.** Подчеркнута важность соблюдения нагрузочных характеристик электропривода, предложен современный электропривод с частотным регулированием, разработана схема электропривода, представлены экономические и экологические обоснования проекта. По итогам моделирования сделан вывод, что можно произвести замену существующего электропривода на электропривод с частотно-регулируемой схемой управления.

**Ключевые слова:** электропривод, брашпиль, модернизация, преобразователь частоты, частотное управление.  
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142  
UDC 629.5.028-83  
EDN: GICGBT

A.B. Volskiy, K.A. Novoselov   
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

## MODERNIZATION OF THE WINDLASS ELECTRIC DRIVE

**Object and purpose of research.** The object of the study is an electric windlass drive. The goal is to improve the windlass electric drive by changing the electric drive control system.

**Materials and methods.** Anchor-mooring devices, which include the windlass, are important elements in ensuring the safety of the vessel, which determines the relevance of the research topic. Windshields with relay-contactor control systems are becoming obsolete, as a result they often have to be repaired, which leads to a decrease in the coefficient of technical readiness and increases economic losses from ship downtime. The article considers the possibility of replacing the relay-contactor control system used by the windlass electric drive with a frequency-controlled control circuit, since the latter has a number of advantages, in particular higher reliability and the possibility of changing mechanical characteristics.

**Main results.** In the course of the study, the algorithm of operation of various electric drive control circuits was studied, the load characteristics and operating modes of the electric drive were analyzed. It was revealed that despite the low cost and main-

*Для цитирования:* Вольский А.Б., Новоселов К.А. Модернизация электропривода брашпиля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 135–142.

*For citations:* Volskiy A.B., Novoselov K.A. Modernization of the windlass electric drive. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 135–142 (in Russian).

tainability, relay-contactor systems have a number of significant drawbacks: high starting currents; increased dynamic loads on the electric motor and electric drive mechanisms; lack of smooth control of the motor rotation speed; low reliability. That is why an autonomous voltage inverter built on the basis of IGBT transistors was used in the upgraded circuit in the frequency converter, which gives a large number of advantages.

**Conclusion.** As a result, the importance of observing the load characteristics of the electric drive is emphasized, a modern electric drive with frequency control is proposed, an electric drive circuit is developed, economic and environmental justifications of the project are presented. Based on the results of the simulation, it was concluded that it is possible to replace the existing electric drive with an electric drive with a frequency-controlled control circuit.

**Keywords:** electric drive, windlass, modernization, frequency converter, frequency control.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В настоящее время в системах управления электроприводом начинают широко применяться преобразователи частоты, что позволяет существенно повысить технико-экономические показатели электроустановок.

На основании проведенного анализа исследований в этой области можно отметить широкое применение частотно-регулируемого электропривода в различных областях гражданской промышленности [1–3]. Вместе с тем в работах [4–6] показана универсальность частотно-регулируемого электропривода и возможность его применения в судовых условиях.

В статье рассматривается возможность применения преобразователя частоты в схеме управления электроприводом брашпиля танкера «Нордвик». Якорно-швартовные устройства, к которым относятся и брашпиль, являются важными элементами в обеспечении безопасности судна, что обуславливает актуальность темы исследования. Брашпили с релейно-контакторными системами управления устаревают, в результате их приходится часто ремонтировать, что ведет к снижению коэффициента технической готовности и увеличивает экономические потери от простоя судна. Цель работы – усовершенствовать электропривод брашпиля путем изменения системы управления электроприводом.

## Анализ возможности применения частотного управления в электроприводе брашпиля

Analysis of the possibility of using frequency control in an electric windlass drive

Танкер «Нордвик», построенный в 1985 г. В Болгарии, принадлежит российской компании «АО Хатангский торговый морской порт». Судно предназначено для перевозки жидких грузов – нефтепродуктов 1–4 классов.

На судне установлен брашпиль с электроприводом на базе асинхронного электродвигателя с переключающими полюсами с релейно-контакторной системой управления (рис. 1).

Электропривод управляется командным контроллером, имеющим три положения в каждом направлении вращения. При его переводе из нейтрального положения в рабочее происходит включение электродвигателя. Привод имеет три скорости, при этом первая скорость обеспечивает нормальные условия работы и является основной. Третья скорость служит для выборки швартовного каната при пониженных нагрузках, кроме того, считается основной при выборке якорной цепи на повышенной скорости.

При отрыве якоря от грунта на валу двигателя развивается максимальный момент, двигатель имеет скорость, близкую к нулю, в результате чего на роторе выделяется энергия, пропорциональная произведению синхронной скорости выключенной обмотки на пусковой момент. С целью автоматического ограничения момента при перегрузке в схему введено грузовое реле, срабатывающее с выдержкой времени, что позволяет плавно вывести двигатель на естественную характеристику после прекращения перегрузки.

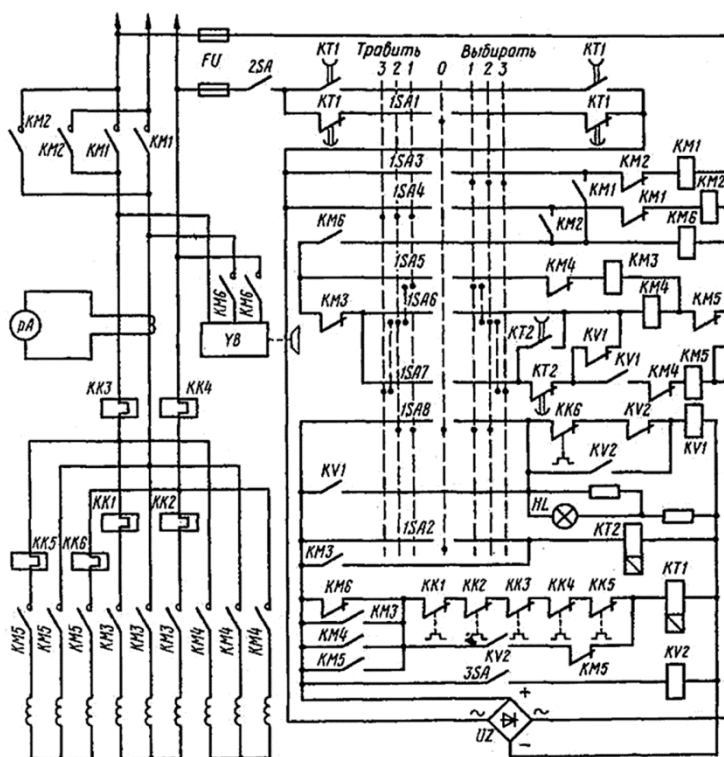
Тепловые реле КК1-КК6 с самовозвратом используются для защиты двигателя от перегрузок. Ввиду особенности эксплуатации якорно-швартовных устройств, электропривод может работать в условиях значительных перегрузок. Для обеспечения работы электропривода в подобных условиях в схеме предусмотрено шунтирование тепловой защиты с помощью реле KV2. Следует отметить, что в этом режиме допускается работа только на первой и второй скоростях.

При очевидных положительных сторонах релейно-контакторных систем управления (таких как низкая стоимость и высокая ремонтпригодность) они обладают и существенными недостатками. В числе последних:

- высокие пусковые токи, в 7–9 раз превышающие номинальный ток двигателя;
- повышенные динамические нагрузки на электродвигатель и механизмы электропривода;

**Рис. 1.** Электрическая структурная схема электропривода брашпиля

**Fig. 1.** Electrical structural diagram of the windlass electric drive



- отсутствие возможности плавного управления скоростью вращения двигателя;
- низкая надежность.

Из рассмотренных возможностей применения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с частотным регулированием скорости можно сделать вывод, что данный тип двигателя нуждается в повышении надежности и оптимизации динамических нагрузок.

Для выбора электродвигателя произведен проверочный расчет электропривода брашпиля, в результате чего получено расчетное значение момента на валу двигателя.

При отрыве якоря от грунта на валу двигателя развивается максимальный нагрузочный момент  $M_{\max} = 280 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , тогда расчетное значение номинального момента двигателя  $M_{\text{н.расч}}$  из [7]:

$$M_{\text{н.расч}} = 0,45 \cdot M_{\max} = 126 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (1)$$

Номинальная мощность электродвигателя  $P_{\text{н.расч}}$  определена по формуле (2):

$$P_{\text{н.расч}} = \frac{M_{\text{н.расч}} \cdot n_{\text{ср}}}{9564} = 18 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{ср}} = 1361 \text{ об/мин}$  – средняя скорость, принятая в качестве расчетного значения номинальной скорости исполнительного двигателя.

По полученному результату  $P_{\text{н.расч}}$  в качестве исполнительного двигателя подобран двигатель переменного тока МАП 521-4. Параметры выбранного электродвигателя приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные параметры электродвигателя МАП 521-4

**Table 1.** Parameters of the MAP 521-4 electric motor

Наименование параметра	Значение
Напряжение $U$ , В	380
Мощность $P$ , кВт	18,5
Число полюсов	4
Коэффициент мощности, $\cos\phi$	0,91
Номинальное скольжение $S_{\text{н}}$ , %	0,16
Номинальная частота вращения $n_{\text{н}}$ , об/мин	1476
Пусковой момент $M_{\text{п}}$ , Н·м	120
Максимальный момент $M_{\text{кр}}$ , Н·м	336
Пусковой ток $I_{\text{п}}$ , А	213,59
Номинальный ток $I_{\text{н}}$ , А	34,45

## Расчет механической характеристики электродвигателя при частотном управлении

Для управления электроприводом номинальная частота вращения двигателя  $n_n$  определяется по формуле:

$$n_n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - S_n) = 1476 \text{ об/мин}, \quad (3)$$

где  $S_n$  – номинальное скольжение, %.

Номинальная частота вращения двигателя  $\omega_n$  определяется по формуле:

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = 154,49 \text{ рад/с}. \quad (4)$$

Для определения критического скольжения двигателя  $S_k$  принято значение  $k_m = 2,8$ :

$$S_k = S_n \cdot \left( k_m + \sqrt{(k_m)^2 - 1} \right) = 0,87. \quad (5)$$

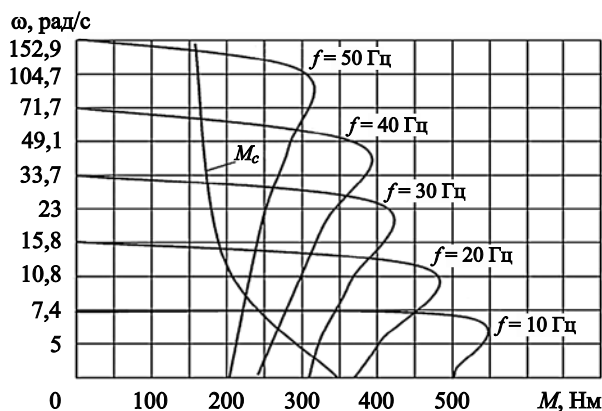
Номинальный момент двигателя  $M_n$  определен по следующей зависимости:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 119,75 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (6)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность двигателя, Вт;  $\omega_n$  – номинальная частота вращения, рад/с.

Тогда критический момент двигателя  $M_k$ :

$$M_k = k_m \cdot M_n = 335,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (7)$$



**Рис. 2.** Механическая характеристика двигателя 180М-4

**Fig. 2.** Mechanical characteristics of the 180M-4 engine

Активным сопротивлением обмотки статора можно пренебречь, тогда приближенно можно считать, что критическое скольжение будет обратно пропорционально частоте:

$$S_{kpf} \approx \frac{S_{kp} \cdot f_{\text{ном}}}{f_1} = \frac{S_{kp}}{\alpha}. \quad (8)$$

Для построения механических характеристик асинхронного двигателя использована упрощенная формула Клосса [11, 12]. Несмотря на то, что указанная формула не дает возможности учитывать влияние различных факторов на механические характеристики, она, благодаря простоте, позволяет сделать общие заключения о работе асинхронного двигателя. Для получения большей точности необходимо использовать экспериментально снятые механические характеристики.

Упрощенное уравнение Клосса для асинхронного двигателя с частотным управлением имеет вид:

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{S_k}{\alpha S} + \frac{\alpha S}{S_k}}, \quad (9)$$

где  $S = \frac{\omega_n - \omega}{\omega_n}$ ;  $M$  – момент двигателя, Н/м;  $\omega$  – частоты вращения двигателя, рад/с.

Результаты расчетов механических характеристик двигателя для значений  $\alpha = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  представлены на рис. 2.

Стабилизировать переменный ток можно при использовании преобразователя частоты Hyundai 300-185HF [9, 10] (табл. 2). Стабилизация необходима для объектов, требующих определенных значений параметров электросети (рис. 3).

В преобразователе частоты для преобразования постоянного напряжения в трехфазное напряжение переменного тока используется автономный инвертор напряжения, построенный по мостовой схеме на базе IGBT-транзисторов с шунтирующими обратными диодами. Управление инвертором осуществляет микросхема широтно-импульсного модулятора, с которой и подается высокочастотный сигнал на управляющий электрод биполярного транзистора.

Транзисторы переключаются многократно вместе с шунтирующими обратными диодами в течение всего периода выходной частоты. Переключение происходит поочередно. В схеме реализован специальный алгоритм управления ШИМ, который

**Таблица 2.** Основные характеристики преобразователя частоты

**Table 2.** Technical characteristics frequency converter

Наименование параметра	Значение
Мощность двигателя, кВт	18,5
Выходной ток, А	48
Производительность, кВА	26,3
Напряжение на выходе, В	Трехфазное, 380–480 В переменного тока
Диапазон выходных частот, Гц	0,1–400
Входное напряжение, В	Трехфазное, 380–480 В ( $\pm 10\%$ )
Входная частота, Гц	50/60 ( $\pm 5\%$ )
Силовой транзистор	IGBT
Метод контроля	Междуфазная синусоида ШИМ
Пусковой вращающий момент	200 %, 0,5 Гц
Перегрузочная способность	150 %, 1 мин

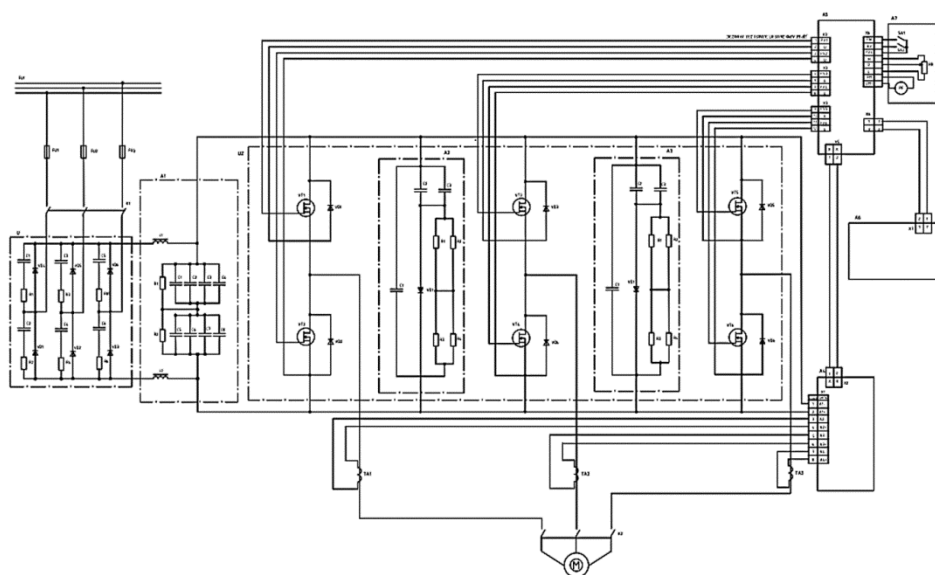
обеспечивает близкое к линейному соотношение выходной частоты и выходного напряжения, а также синусоидальность формы тока нагрузки.

Это дает много преимуществ по сравнению с другими преобразователями, а именно:

- контроль синусоидальности 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 синусоидальность напряжения или тока при работе на нелинейной нагрузке;
- скоростное ограничение токов и напряжений в случае аварийного режима;
- высокий КПД;
- низкий уровень шума;
- проста в обслуживании;
- при выходе из строя составного элемента заменяется блок целиком;
- менее дорогостоящий ремонт по сравнению с электромашинными преобразователями.

**Рис. 3.** Модернизированная принципиальная электрическая схема электропривода брашпиля с частотным управлением

**Fig. 3.** Upgraded schematic diagram of the windlass electric drive with frequency control



## Экономическое обоснование проекта

### Cost efficiency assessment

В настоящее время при внедрении нового технического устройства или решения требуется наличие экономической эффективности, т.к. это один из важнейших показателей, обеспечивающих конкурентоспособность. Кроме того, при экономическом обосновании проекта необходимо учитывать такие показатели, как эффективность капиталовложения и эксплуатация электрооборудования, а также срок окупаемости.

Расчеты затрат на эксплуатацию проводились в сравнении с базовым оборудованием. При этом для базового оборудования использованы данные фактических эксплуатационных затрат на судне, а для модернизированной схемы электропривода – данные заводов – изготовителей оборудования.

Затраты на эксплуатацию складываются из затрат на техническое обслуживание (ТО) и затрат на ремонт.

Затраты на ТО определяются по формуле:

$$R = C_{\text{то}} \cdot t_{\text{то}},$$

где  $C_{\text{то}}$  – стоимость нормо-часа на ТО ( $C_{\text{то}} = 300$  руб./ч),  $t_{\text{то}}$  – норма часов на выполнение работ по ТО (для базового оборудования  $t_{\text{тоб}} = 500$  ч, для модернизированного  $t_{\text{том}} = 150$  ч).

Таким образом, затраты на техническое обслуживание базового оборудования составили:  $R_{\text{б}} = 150\,000$  руб., модернизированного –  $R_{\text{м}} = 30\,000$  руб.

Экономия затрат на техническое обслуживание за год составит:

$$\mathcal{E}_{\text{гто}} = R_{\text{б}} - R_{\text{м}} = 120\,000 \text{ руб.}$$

**Таблица 3.** Показатели экономической эффективности

**Table 3.** Economic efficiency indicators

Наименование показателя	Величина
Стоимость изготовления, руб.	249 965
Экономия средств на проведение технического обслуживания, руб.	120 000
Экономия от внеплановых ремонтов, руб.	15 897
Срок окупаемости, год	1,5

Количество внеплановых ремонтов за год определяется по формуле:

$$N_{\text{р}} = \frac{T_{\text{р}}}{T_{\text{о}}},$$

где  $T_{\text{р}} = 325$  ч – среднее время наработки системы в течение года, ч;  $T_{\text{о}}$  – среднее время наработки на отказ, ч. Для базового оборудования по статистическим данным фактической эксплуатации данным  $T_{\text{об}} = 5000$  ч, для модернизированного оборудования, по данным заводов-изготовителей,  $T_{\text{ом}} = 11\,800$  ч.

Таким образом, количество внеплановых ремонтов для базовой системы управления  $N_{\text{рб}} = 0,65$ , а для модернизированной системы управления  $N_{\text{рм}} = 0,0275$ .

Ежегодные затраты на внеплановый ремонт определяются по формуле:

$$C_{\text{р}} = C_{\text{р}} \cdot N_{\text{р}},$$

где  $C_{\text{р}}$  – средняя стоимость одного внепланового ремонта, руб.;  $N_{\text{р}}$  – количество внеплановых ремонтов. Средняя стоимость одного внепланового ремонта в среднем составляет  $C_{\text{н}} = 25\,533$  руб., тогда ежегодные затраты на внеплановый ремонт составят:

- для базовой системы:  $C_{\text{рб}} = 16\,600$  руб.;
- для разработанной системы:  $C_{\text{рм}} = 703$  руб.

Годовая экономия от внепланового ремонта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{гр}} = C_{\text{рб}} - C_{\text{рм}} = 15\,897 \text{ руб.}$$

Годовая экономия при эксплуатации системы брашпиля определяется как сумма экономии на техническое обслуживание и экономии от внеплановых ремонтов:

$$\mathcal{E}_{\text{эк}} = \mathcal{E}_{\text{гто}} + \mathcal{E}_{\text{гр}} = 135\,897 \text{ руб.}$$

Время, необходимое для окупаемости капиталовложений, рассчитываем по формуле:

$$T = \frac{S}{\mathcal{E}_{\text{эк}}} = 1,5 \text{ года},$$

где  $S = 20\,8304$  – капитальные затраты на оборудование, руб.

За нормативную величину срока окупаемости принимается срок  $T_{\text{н}} = 3$  года. Расчетный срок окупаемости модернизированного электропривода брашпиля  $T = 1,5$  года, что позволяет сделать вывод об экономической эффективности исследования. Экономический расчет приведен в табл. 3.

## Заключение

### Conclusion

Электроприводы с непосредственными преобразователями частоты обладают следующими преимуществами: более высокая надежность по сравнению с релейно-контакторным управлением; возможность изменения механических характеристик, что позволяет повысить качество динамических режимов и эффективность использования брашпиля.

В ходе выполнения исследования:

- подтверждена возможность модернизации электропривода брашпиля за счет применения частотно-регулируемого электропривода;
- предложен современный преобразователь частоты и напряжения;
- описаны технические характеристики и достоинства;
- проведен анализ схем преобразования;
- произведены расчеты механических характеристик частотно-регулируемого электропривода брашпиля;
- разработана и описана схема модернизированного электропривода;
- даны экономическая и экологическая оценки.

## Список использованной литературы

1. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод буровой лебедки / *М.М. Муминов, З.У. Бойхонов, Ф.Н. Юлдашев, А.А. Хашимов* // Молодой ученый. 2016. № 20(124). С. 176–179.
2. *Черевков Г.И., Егоров А.Н.* Внедрение частотно-регулируемого привода на насосных станциях // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3, т. 2. С. 319–320. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14988> (дата обращения: 23.05.2023).
3. *Саксонов А.С.* Эффективность применения частотно регулируемого электропривода для сетевых насосов теплоэлектроцентралей // Молодой ученый. 2019. № 39(277). С. 201–203.
4. *Михеев Е.А.* Частотное регулирование электропривода // Символ науки. 2016. № 11(23). Т. 3. С. 124–126.
5. Применение преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования / *Н.Г. Романенко, С.В. Головкин, К.Н. Сатенов, М.П. Жуманазаров* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 1. С. 77–84.
6. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя / *Мустафа Г.М.* [и др.] // Электротехника. 2014. № 1. С. 46–53.

7. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. Москва: РАСХН, 2003. 320 с.
8. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование: НД № 2-020101-104 / Российский морской регистр судостроения. Санкт-Петербург, 2018. 138 с.
9. СПЧН 250 [Статический преобразователь частоты и напряжения] // НИИ ЛМ Инвертор : [сайт]. Москва, 2023. URL: <http://lm-inverter.ru/ru/produkcija-i-razrabotka/katalog/staticheskie-preobrazovateli-chastoty/spchn-250> (дата обращения: 02.02.2023).
10. Что такое преобразователь частоты и для чего он нужен // VEDA MC [сайт]. URL: <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli> (дата обращения: 02.02.2023).
11. *Чекунов К.А.* Судовые электроприводы и электродвижение судов. 4-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Судостроение, 1986. 350 с.
12. *Ключев В.И.* Теория электропривода. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

## References

1. Frequency-controlled asynchronous drive for drilling winch / *M.M. Muminov, Z.U. Boykhanov, F.N. Yuldashev, A.A. Hashimov* // Young Scientist. 2016. No. 20(124). P. 176–179 (in Russian).
2. *Cherevkov G.I., Yegorov A.N.* Application of frequency-controlled drive at pumping stations // International Student Research Bulletin. 2016. No. 3, vol. 2. P. 319–320. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14988> (Accessed: 23.05.2023) (in Russian).
3. *Saksonov A.S.* Efficiency of frequency-controlled electric drive for main-line pumps of heat-and-power plants // Young Scientist. 2019. No. 39(277). P. 201–203 (in Russian).
4. *Mikheev Ye.A.* Frequency control of electric drive // Simvol Nauki (Symbol of Science). 2016. No. 11(23), vol. 3. P. 124–126 (in Russian).
5. Frequency converters as power supplies for marine electrics / *N.G. Romanenko, S.V. Golovko, K.N. Satenov, M.P. Zhumanazarov* // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2016. No. 1. P. 77–84 (in Russian).
6. Frequency converter for propulsion motor / *G.M. Mustafa* [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2014. No. 1. P. 46–53 (in Russian).
7. *Onischenko G.B.* Electric drive. Moscow: RAAS, 2003. 320 p. (in Russian).
8. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships (2018 edition). Part XI. Electric equipment. 138 p. (in Russian).

9. Static frequency and voltage converter // Web site of NPP LN Inverter. Moscow, 2023. URL: <http://lm-inverter.ru/ru/produkcija-i-razrabotki/katalog/staticheskie-preobrazovateli-chastoty/spchn-250> (Accessed: 02.02.2023) (*in Russian*).
10. What is frequency converter and why you need it // Web site of VEDA MC. URL: <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli> (Accessed: 02.02.2023) (*in Russian*).
11. *Chekunov K.A.* Marine electric drives and propulsion. 4<sup>th</sup> edition, rev. and enl. Leningrad : Sudostroyeniye, 1986. 350 p. (*in Russian*).
12. *Klyuchev V.I.* Theory of electric drive. 2<sup>nd</sup> edition, rev. and enl. Moscow : Energoatomizdat, 2001. 704 p. (*in Russian*).

---

### Сведения об авторах

*Вольский Антон Борисович*, к.т.н., доцент кафедры электрооборудования и автоматизации судов Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический

университет». Адрес: 236029, Россия, Калининград, Молодежная ул., д. 6. E-mail: [koha73@yandex.ru](mailto:koha73@yandex.ru).

*Новоселов Кирилл Андреевич*, ст. преподаватель кафедры электрооборудования и автоматизации судов Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». Адрес: 236029, Россия, Калининград, Молодежная ул., д. 6. Тел.: E-mail: [kirill-n1996@mail.ru](mailto:kirill-n1996@mail.ru). <http://orcid.org/0000-0002-4206-6150>.

### About the authors

*Anton B. Volsky.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Marine Electrics and Automation Department, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University. Address: 6, Molodezhnaya st., Kaliningrad, Russia, post code 236029. E-mail: [koha73@yandex.ru](mailto:koha73@yandex.ru).

*Kirill A. Novoselov*, Senior Lecturer, Marine Electrics and Automation Department, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University. Address: 6, Molodezhnaya st., Kaliningrad, Russia, post code 236029. E-mail: [kirill-n1996@mail.ru](mailto:kirill-n1996@mail.ru). <http://orcid.org/0000-0002-4206-6150>.

Поступила / Received: 28.03.23  
Принята в печать / Accepted: 29.08.23  
© Вольский А.Б., Новоселов К.А., 2023