

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

MARINE ELECTRICAL GENERATING COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья
УДК 621.313.3
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-50-57>

Повышение эффективности электроэнергетической системы земснаряда

*Алексей Олегович Кечкин^{1✉}, Александр Сергеевич Плехов²,
Олег Станиславович Хватов³*

^{1,2} Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижегород, Россия, akechkin@bk.ru[✉]

³ Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижегород, Россия

Аннотация. Большинство речных земснарядов имеют в составе несколько электроприводов позиционирования, электропривод грунтового насоса и насоса гидроразмыва. Перечисленные электроприводы являются главными потребителями электроэнергии дизель-генераторных установок земснаряда. Для снижения расхода топлива дизель-генераторными установками целесообразно изменить структуру судовой электроэнергетической сети. Определены энергетические характеристики системы электроприводов земснаряда с различной конфигурацией преобразователей электрической энергии. Разработаны имитационные модели энергосистем постоянного и переменного тока земснаряда. Построение моделей происходило посредством программного обеспечения MATLAB Simulink и библиотеки SimPowerSystem. Использование имитационных моделей позволило получить оценку эффективности применения в энергосистеме земснаряда шины постоянного тока. Проиллюстрированы схемы электроэнергетической системы земснаряда, электроприводов папильонажных лебедок. Проанализированы режимы работы электроприводов папильонажных лебедок. Выявлена необходимость анализа функционирования электроприводов и формирования сигналов управления тормозными резисторами преобразователя частоты в системе контроля мощности. Рассматриваются параметры представленных электроприводов и их значения. Приведены выражения для расчета полной мощности узлов системы с учетом особенностей режимов работы электроприводов земснаряда на базе сети переменного тока. Применение разработанного варианта энергосистемы способствует экономии капитальных затрат и удельного расхода топлива. Модернизация энергосистемы позволяет уменьшить мощность дизельных генераторов и увеличить КПД системы, уменьшить мощность системы вентиляции отсеков с преобразователями частоты лебедок благодаря использованию рекуперативного торможения электроприводами.

Ключевые слова: электропривод, шина постоянного тока, активный выпрямитель, дизель-генераторная установка, мощность, преобразователь частоты

Для цитирования: Кечкин А. О., Плехов А. С., Хватов О. С. Повышение эффективности электроэнергетической системы земснаряда // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 50–57. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-50-57>.

Original article

Improving efficiency of dredger electric power system

Aleksei O. Kechkin^{1✉}, Aleksandr S. Plekhov², Oleg S. Khvatov³

^{1,2} Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia, akechkin@bk.ru[✉]

³ Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Most river dredgers are equipped with several electric positioning drives, a soil pump electric drive and a hydraulic washing pump. The listed electric drives are the main consumers of electricity from the dredger diesel generators. It is necessary to change the structure of the ship electric power network in order to reduce fuel consumption by diesel generators. The energy characteristics of the dredger electric drive system with a different configuration of the converter equipment are determined. Simulation models of the dredger DC and AC power systems have been developed. The models were built using MATLAB Simulink software and SimPowerSystem library. Application of simulation models made it possible to assess the efficiency of using a DC bus in the power system of the dredger. The circuits of the dredger electric power system, electric drives of cross-dredging winches are illustrated. The operation modes of electric drives of cross-dredging winches are analyzed. The necessity of analyzing the operation of electric drives and of developing the control signals for the braking resistors of the frequency converter in the power control system is revealed. The parameters of the presented electric drives and their values are considered. The expressions for calculating the total power of the system nodes are given, taking into account the characteristics of the operating modes of the dredger electric drives based on an alternating current network. Using the developed version of the power system contributes to saving capital costs and specific fuel consumption. Modernization of the power system helps reduce the power of diesel generators, increase the efficiency of the system and reduce the power of the ventilation system of compartments with winch frequency converters, due to regenerative braking by the electric drives.

Keywords: electric drive, DC bus, active rectifier, diesel generator, capacity, frequency converter

For citation: Kechkin A. O., Plekhov A. S., Khvatov O. S. Improving efficiency of dredger electric power system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;1:50-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-50-57>.

Введение

Статья посвящена изучению результатов модернизации электроэнергетической системы речного якорно-свайного земснаряда проекта 4395. Судно данного типа предназначено для разработки песчаных, илистых и песчано-гравийных грунтов, дноуглубления и намыва дамб, с возможностью выдачи грунта в шаланды и по плавучему пульповоду.

Классической архитектурой построения энергосистемы земснаряда является сеть переменного тока 400 В, 50 Гц. Основными потребителями электрической энергии в земснарядах являются электроприводы лебедок и насосов. Источниками энергии для данных устройств являются дизель-генераторные установки (ДГУ).

Заявленная автономность судна составляет не менее 20 сут. Запасы смазочных материалов и топлива являются основными параметрами, определяющими автономность земснаряда. От эффективности использования мощности генераторов зависит множество параметров используемой электроэнергии, определяющих расход топлива ДГУ.

Электроэнергетическая система земснаряда

Электроприводы земснаряда (рис. 1) оснащены асинхронными двигателями и преобразователями частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока (ЗПТ). Для обеспечения работы электроприводов в режиме торможения и защиты от возможных перенапряжений в ЗПТ каждый ПЧ оснащен блоком тормозных резисторов.

Электродвигатели лебедок, грунтового насоса и насоса гидроразмыва управляются с помощью преобразователей частоты (4, 6, 8 на рис. 1) различной мощности. Данные преобразователи достаточно чувствительны к качеству питающей элек-

троэнергии [1] и вносят высшие гармоники тока в энергосистему. Коэффициент мощности ПЧ невысок из-за значительного уровня высших гармоник в потребляемом токе [2].

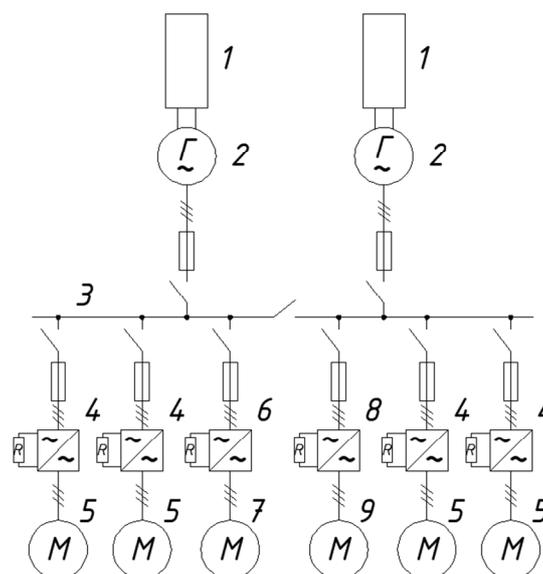


Рис. 1. Электроэнергетическая система земснаряда: 1 – дизель; 2 – генератор; 3 – главный распределительный щит (ГРЩ) переменного тока; 4 – ПЧ привода лебедки; 5 – электродвигатель лебедки; 6 – ПЧ привода грунтового насоса; 7 – электродвигатель грунтового насоса; 8 – ПЧ привода насоса гидроразмыва; 9 – электродвигатель насоса гидроразмыва

Fig. 1. Dredger electric power system: 1 - diesel; 2 - generator; 3 - main AC switchboard (MSB); 4 - winch drive frequency converter (FC); 5 - winch motor; 6 - drive FC of the soil pump; 7 - electric motor of the soil pump; 8 - drive FC of the hydraulic washing pump; 9 - electric motor of hydraulic washing pump

Высокочастотные составляющие токов ускоряют процесс старения изоляции кабельных линий, являются причиной повышенного расхода топлива ДГУ и увеличения нагрева отдельных участков сети [3].

К недостаткам использования электроэнергетической системы на базе сети переменного тока также относятся сложность реализации параллельной работы ДГУ и необходимость использования дополнительного оборудования для синхронизации установок. Ошибка в процессе синхронизации ДГУ может вызвать повреждения в энергосистеме судна, возможны отказы преобразовательного оборудования и отключение электросети судна.

Модернизация электроэнергетической системы

Одним из способов повышения энергоэффективности земснаряда является использование энергосистемы на базе шины постоянного тока (рис. 2).

Данная структура энергосистемы имеет несколько преимуществ. Активные выпрямители (3 на рис. 2) позволяют повысить величину напряжения на шине постоянного тока, при этом снижаются потери в силовых кабелях. Электродвигатели лебедок (6 на рис. 2) могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Так как автономные инверторы (5, 7, 9 на рис. 2) электродвигателей являются четырехквadrантными преобразователями, энергию рекуперативного торможения лебедками можно использовать для снижения потребляемой мощности системы. Активные выпрямители способны поддерживать параметры сети постоянного тока при изменении оборотов ДГУ, появляется возможность снижать обороты ДГУ для уменьшения расхода топлива [4].

Работа электроприводов земснаряда

Грунтовый насос и насос гидроразмыва являются основными узлами земснаряда, а их электроприводы – главными потребителями электроэнергии ДГУ. Данные устройства могут работать полный (восьмичасовой) рабочий день, в зависимости от типов разрабатываемого грунта.

Папильонажные лебедки (рис. 3) используются для поддержания непрерывного контакта грунтозаборного устройства с разрабатываемым грунтом и позиционирования.

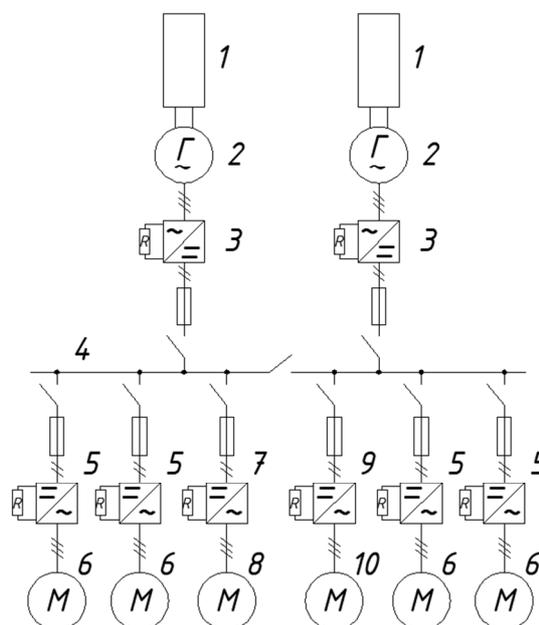


Рис. 2. Электроэнергетическая система земснаряда на базе шины постоянного тока: 1 – дизель; 2 – генератор; 3 – активный выпрямитель; 4 – ГРЩ постоянного тока; 5 – автономный инвертор привода лебедки; 6 – электродвигатель лебедки; 7 – автономный инвертор привода грунтового насоса; 8 – электродвигатель грунтового насоса; 9 – автономный инвертор привода насоса гидроразмыва; 10 – электродвигатель насоса гидроразмыва

Fig. 2. Dredger electric power system based on the DC bus: 1 - diesel; 2 - generator; 3 - active rectifier; 4 - DC main switchboard; 5 - winch drive autonomous inverter; 6 - winch motor; 7 - soil pump drive autonomous inverter; 8 - slurry pump electric motor; 9 - autonomous inverter of the hydraulic washing pump drive; 10 - electric motor of the hydraulic washing pump

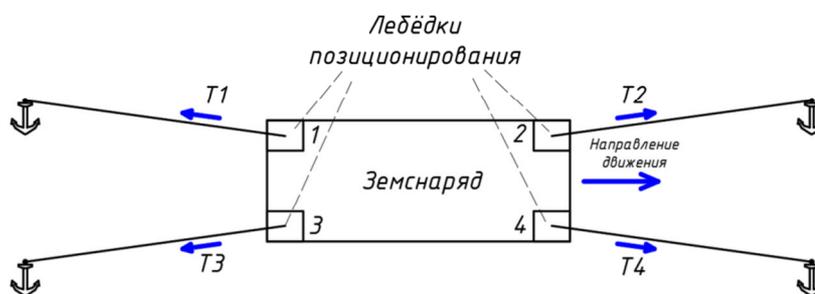


Рис. 3. Электроприводы папильонажных лебедок

Fig. 3. Cross-dredging winch electric drives

Режимы работы электроприводов папильонажных лебедок можно описать следующим образом. Для движения земснаряда в направлении, указанном на рис. 3, электродвигатели лебедок 2 (Т2) и 4 (Т4) работают на номинальной мощности и приводят судно в движение. Электродвигатели лебедок 1 (Т1) и 3 (Т3) создают тормозной момент, равный 30 % от номинального, поддерживая все тросы в натянутом состоянии. Движение с натянутыми тросами обеспечивает безопасность при маневрировании судна и уменьшает вероятность неправильной намотки тросов лебедок.

Работа генератора ДГУ в двигательном режиме недопустима. Наличие в энергосистеме земснаряда электроприводов, способных рекуперировать энергию в питающую сеть, требует установки специальной системы контроля потребляемой мощности. По данной причине из структуры ПЧ нельзя исключить тормозные резисторы. Система контроля мощности должна анализировать работу электроприводов и формировать сигналы управления тормозными резисторами ПЧ.

Оценка энергетических характеристик

Параметры рассмотренных электроприводов (электродвигатели и преобразователи частоты) земснаряда указаны в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры электроприводов

Parameters of electric drives

Параметр	Значение
Электропривод грунтового насоса (АИР 355 MLD4)	
Мощность двигателя $P_n^{грунт}$, кВт	500
КПД двигателя $\eta_{двиг}^{грунт}$, %	95,8
КПД ПЧ $\eta_{пч}^{грунт}$, %	98
Коэффициент мощности ПЧ $km^{грунт}$, отн. ед.	0,8
Электропривод насоса гидроразмыва (АИР 315 M4)	
Мощность двигателя $P_n^{гидр}$, кВт	200
КПД двигателя $\eta_{двиг}^{гидр}$, %	95,6
КПД ПЧ $\eta_{пч}^{гидр}$, %	97,5
Коэффициент мощности ПЧ $km^{гидр}$, отн. ед.	0,7
Электропривод лебедок (АИР 180 M4)	
Мощность двигателя $P_n^{лб}$, кВт	30
КПД двигателя $\eta_{двиг}^{лб}$, %	91,5
КПД ПЧ $\eta_{пч}^{лб}$, %	96
Коэффициент мощности ПЧ $km^{лб}$, отн. ед.	0,66

С учетом особенностей режимов работы электроприводов земснаряда на базе сети переменного

тока полные мощности узлов системы можно получить, используя следующие выражения:

$$S^{грунт} = \frac{P_n^{грунт}}{\eta_{двиг}^{грунт}} \cdot \frac{1}{\eta_{пч}^{грунт}} \cdot \frac{1}{km^{грунт}} = \frac{500}{0,958} \cdot \frac{1}{0,98} \cdot \frac{1}{0,8} \approx 666,$$

где $S^{грунт}$ – полная мощность, потребляемая грунтовым насосом, кВА;

$$S^{гидр} = \frac{P_n^{гидр}}{\eta_{двиг}^{гидр}} \cdot \frac{1}{\eta_{пч}^{гидр}} \cdot \frac{1}{km^{гидр}} = \frac{200}{0,956} \cdot \frac{1}{0,975} \cdot \frac{1}{0,7} \approx 307,$$

где $S^{гидр}$ – полная мощность, потребляемая насосом гидроразмыва, кВА;

$$S^{лб} = \frac{P_n^{лб}}{\eta_{двиг}^{лб}} \cdot \frac{1}{\eta_{пч}^{лб}} \cdot \frac{1}{km^{лб}} = \frac{30}{0,915} \cdot \frac{1}{0,96} \cdot \frac{1}{0,66} \approx 52,$$

где $S^{лб}$ – полная мощность, потребляемая приводом лебедки, при работе на номинальной мощности, кВА.

Значительная доля потребляемой мощности каждого электропривода является мощностью искажения, которая не совершает полезной работы, уменьшает КПД системы в целом.

Поскольку лебедки 1 и 3 (рис. 3) работают в тормозных режимах, генерируемая их двигателями энергия рассеивается в тормозных резисторах и не влияет на параметры питающей сети:

$$P_{торм} = P_1 + P_3 = 2P_n \cdot 0,3 \approx 18,$$

где $P_{торм}$ – мощность, рассеиваемая на тормозных резисторах, кВт; P_1, P_3 – мощности лебедок 1 и 3.

Поскольку мощность $P_{торм}$ полностью переходит в тепловую энергию, использование такой конфигурации преобразовательного оборудования вынуждает проектантов судна устанавливать в отсеки с ПЧ мощную систему вентиляции для отвода тепла от тормозных резисторов.

Для оценки суммарной мощности, потребляемой электроприводами при различных структурах энергосистем, были созданы имитационные модели. Модели построены с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink и библиотеки SimPowerSystems. Модель энергосистемы земснаряда на базе сети переменного тока изображена на рис. 4.

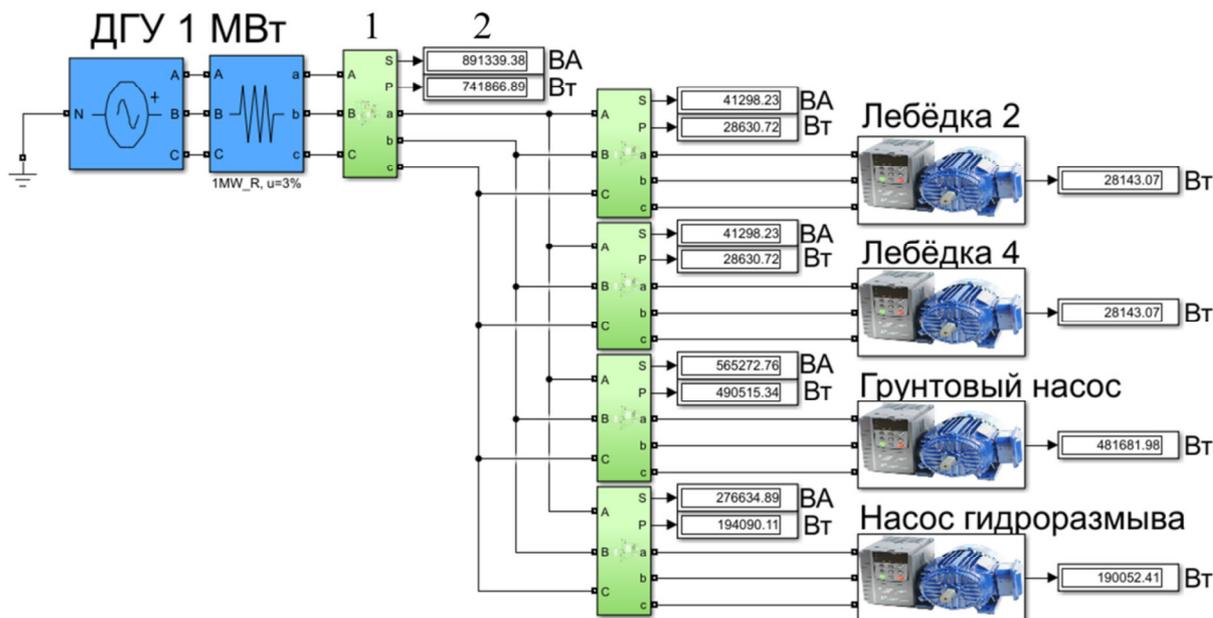


Рис. 4. Модель энергосистемы на базе сети переменного тока

Fig. 4. Model of a power system based on AC network

Все необходимые параметры для моделирования работы электродвигателей АИР 355 MLD4, АИР 315 M4, АИР 180 M4 в пакете MATLAB Simulink были определены с помощью методики, описанной в [5].

Для оценки соотношения активной и полной потребляемой мощности (2 на рис. 4) каждого

электропривода и системы в целом в модели используется блок измерений (1 на рис. 4). Результаты моделирования работы системы электроприводов с энергосистемой на базе сети переменного тока представлены на рис. 5 и в табл. 2.

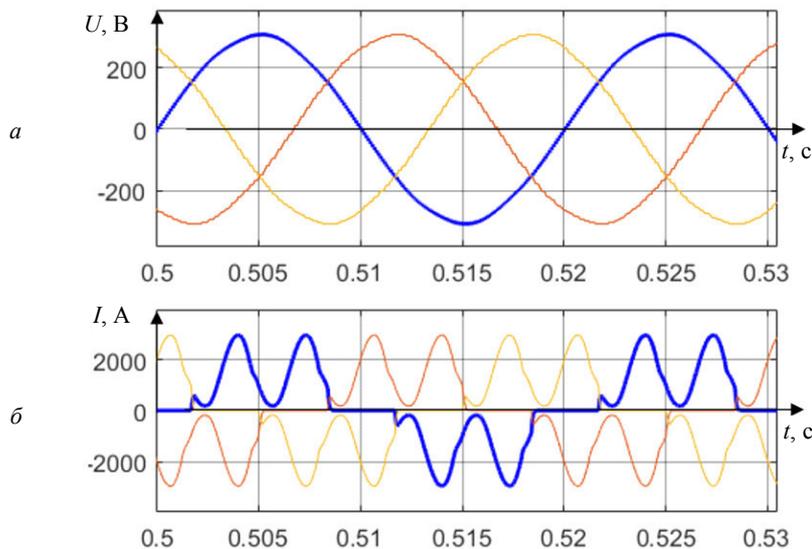


Рис. 5. Фазные напряжения (а) и токи ДГУ (б) при работе электроприводов с энергосистемой на базе сети переменного тока

Fig. 5. Phase voltages (a) and currents (б) of a diesel generator during operation of electric drives with a power system based on AC network

Таблица 2

Table 2

Результаты моделирования энергосистемы на базе сети переменного тока

AC Power system simulation result

Параметр	Значение
Полная мощность S_{AC} , кВА	891
Активная мощность P_{AC} , кВт	742
Коэффициент мощности km_{AC} , отн. ед.	$\approx 0,83$

Работа электроприводов лебедок и насосов в энергосистеме, построенной на базе сети переменного тока, сопровождается значительным различием между величинами активной и полной мощности. Форма потребляемого тока ДГУ данной энергосистемы сопоставима с показателями энергосистем схожей структуры [6]. Для повышения коэффициента мощности (km_{AC}) системы необходимо увеличить величину индуктивности дросселей ЗПТ. При увеличении индуктивности дросселей в два раза коэффициент мощности системы возрастает до значения $km_{AC} = 0,9$ (рост – менее 10 %). Дальнейшее увеличение индуктивностей дросселей оказывает слабое влияние на увеличение коэффициента мощности системы и не является рациональным решением. Пределом для данного способа построения энергосистемы является значение $km_{AC} = 0,95$, для этого необходимо увеличить индуктивность дросселей ЗПТ в 6 раз. Применение данной структуры энергосистемы не позволяет использовать энергию рекуперативного торможения лебедками для снижения активной составляющей потребляемой мощности.

Построение энергосистемы на базе сети постоянного тока позволяет использовать особенности работы электроприводов лебедок. Модель энергосистемы земснаряда на базе сети постоянного тока представлена на рис. 6.

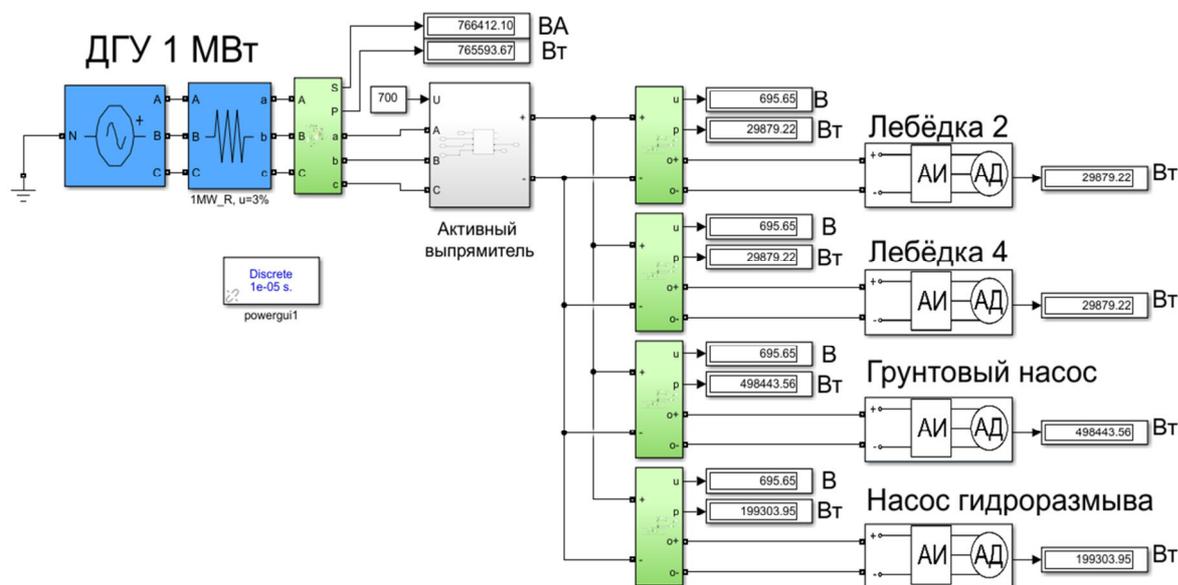


Рис. 6. Модель энергосистемы на базе сети постоянного тока

Fig. 6. Model of a power system based on a DC network

Величина напряжения шины постоянного тока имитационной модели $U_{DC} = 700$ В. Для оценки величины потребляемой мощности каждым узлом и системы в целом в модели используется блок измерений. Результаты моделирования работы электропроводов в энергосистеме на базе сети постоянного тока представлены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 3
 Table 3

Результаты моделирования энергосистемы на базе сети постоянного тока
DC Power system simulation results

Параметр	Значение
Полная мощность S_{DC} , кВА	744
Активная мощность P_{DC} , кВт	743
Коэффициент мощности km_{DC} , отн. ед.	$\approx 0,99$

Kedkin A. O., Pektov A. S., Khvatov O. S. Improving efficiency of dredger electric power system

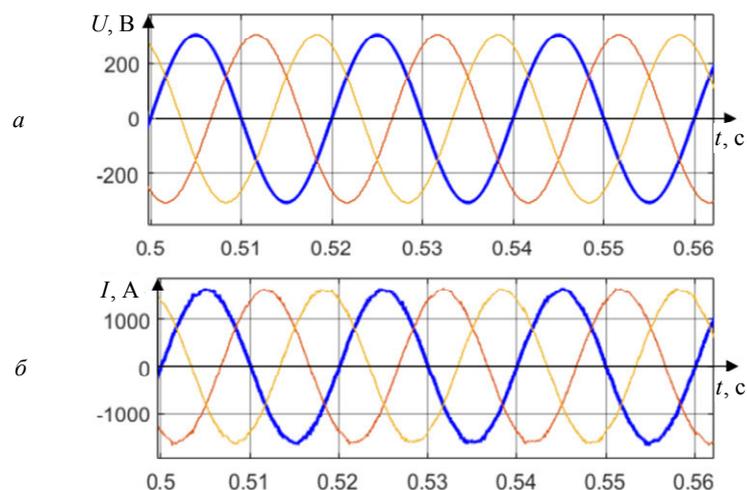


Рис. 7. Фазные напряжения (а) и токи ДГУ (б) при работе электроприводов в энергосистеме на базе сети постоянного тока

Fig. 7. Phase voltages (a) and currents (b) of a diesel generator during the operation of electric drives in a power system based on a DC network

Коэффициент мощности системы электроприводов в энергосистеме, построенной на базе сети постоянного тока, достигает значений km_{DC} , близких к 1. Использование данной структуры позволяет выбрать ДГУ на меньшую мощность ($S_{DC} - S_{AC} \approx 150$ кВА), удельный расход топлива такой установки будет меньше.

Реализация энергосистемы земснаряда на базе шины постоянного тока позволяет использовать особенности работы электроприводов объекта. При использовании данной энергосистемы ($U_{DC} = 700$ В) уменьшается количество силовых проводников благодаря переходу с трехфазной системы токов и напряжений на систему постоянного тока, соответственно, уменьшается вес и размер кабельных трасс, также снижаются и потери в них. Появляется возможность упростить систему синхронизации ДГУ и реализовать режим работы с переменной частотой вращения.

Заключение

Использование электроэнергетической системы, построенной на базе шины постоянного тока, позволяет снизить полную потребляемую мощность в среднем на 20 %. Уменьшается стоимость ДГУ, снижается удельный расход топлива. Кроме того, применение предлагаемой структуры энергосистемы позволяет увеличить полезную площадь судовых помещений. Объединение преобразователей по шине постоянного тока позволяет реализовать возможность рекуперативного торможения лебедками земснаряда. Это позволяет снизить мощность системы вентиляции в отсеках с преобразователями и дополнительно сократить расход топлива ДГУ. Улучшается гармонический состав токов и напряжений ДГУ. Уменьшается количество силовых проводников и снижаются дополнительные потери мощности в кабельных линиях, улучшается КПД системы.

Список источников

1. Фираго Б. И., Медведев К. М. Оценка влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав прерывистого входного тока системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2005. № 3. С. 47–54.
2. Тихомиров В. А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. 2018. № 3 (122). С. 92–106.
3. Куделина Д. В., Бирюлин В. И. Определение нагрева изоляции кабельных линий с учетом влияния токов высших гармоник // Auditorium. 2019. № 1 (21). С. 35–41.
4. Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С., Соколов В. В. Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 217–225.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
6. Григорьев А. В., Сентябрев Ю. В. Судовые единые электроэнергетические системы и системы электродвижения (опыт проектирования, испытаний и эксплуатации). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 207 с.

References

1. Firago B. I., Medvedev K. M. Otsenka vliianiia nesimmetrii napriazheniia pitaiushchei seti na garmonicheskii sostav preryvistogo vkhodnogo toka sistemy «Preobrazovatel' chastoty – asinkhronnyi dvigatel'» [Evaluating influence of supply voltage unbalance on harmonic composition of intermittent input current of frequency converter - asynchronous motor system]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2005, no. 3, pp. 47-54.
2. Tikhomirov V. A. Metodika rascheta energeticheskikh pokazatelei preobrazovatel'nykh ustroystv [Methods of calculating energy parameters of converting devices]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R. E. Alekseeva*, 2018, no. 3 (122), pp. 92-106.
3. Kudelina D. V., Biriulin V. I. Opredelenie nagreva izoliatsii kabel'nykh liniy s uchetom vliianiia tokov vysshikh garmonik [Calculating insulation heat of cables taking into account influence of currents of higher harmonics]. *Auditorium*, 2019, no. 1 (21), pp. 35-41.
4. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B., Samoiaevchev I. S., Sokolov V. V. Elektrostantsii avtonomnykh ob"ektov na baze dizel'-generatornykh ustanovok peremennoi chastoty vrashcheniia [Power plants of autonomous objects based on variable speed diesel generators]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R. E. Alekseeva*, 2015, no. 2 (109), pp. 217-225.
5. Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink software]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
6. Grigor'ev A. V., Sentiabrev Iu. V. *Sudovye edinye elektroenergeticheskie sistemy i sistemy elektrodvizheniia (opyt proektirovaniia, ispytaniia i ekspluatatsii)* [Ship unified electric power systems and electric propulsion systems (experience in design, testing and operation)]. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGETU «LETI», 2020. 207 p.

Статья поступила в редакцию 30.12.2021; одобрена после рецензирования 17.01.2022; принята к публикации 26.01.2022
The article was submitted 30.12.2021; approved after reviewing 17.01.2022; accepted for publication 26.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Олегович Кечкин – аспирант кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики; Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24; akechkin@bk.ru

Александр Сергеевич Плехов – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики; Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24; aplehov@mail.ru

Олег Станиславович Хватов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; khvatov_oleg@mail.ru

Aleksei O. Kechkin – Postgraduate Student of the Department of Electrical Equipment, Electric Drive and Automation; Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev; 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24; akechkin@bk.ru

Aleksandr S. Plekhov – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment, Electric Drive and Automation; Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev; 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24; aplehov@mail.ru

Oleg S. Khvatov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5; khvatov_oleg@mail.ru

