

УДК 621.314.222.68::62-83::629.5.028

EDN CNRRAP

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОЩНОСТИ СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЯКОРНО-ШВАРТОВНОГО МЕХАНИЗМА

С. В. Попов

ORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: popovsev3@ya.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

О. А. Бурмакин

ORCID: 0009-0003-4405-7674 e-mail: boa_71@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Ю. С. Малышев

ORCID: 0000-0001-9008-1198 e-mail: elektrikasp@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены вопросы выбора установленной мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартовного механизма в условиях ограниченности промышленной серии электроприводов лебедок с напряжением питания 220 В. Разработана модель системы электроснабжения электропривода лебедки, включающая силовой трансформатор и судовой генератор, для исследования влияния процессов пуска электропривода на судовую сеть. Выполнено моделирование различных режимов работы электропривода лебедки и приведены результаты моделирования. Представлены диаграммы временных, электрических и механических параметров электропривода в зависимости от соотношения мощности согласующего трансформатора и электродвигателя лебедки. Проведен анализ результатов моделирования и построены сравнительные характеристики для ряда мощностей трансформаторов. Сделаны выводы и даны рекомендации по определению мощности согласующего трансформатора с учетом установленных требований к электроприводу.

Ключевые слова: качество напряжения, мощность трансформатора, переходные процессы, согласующий трансформатор, судовой электропривод, якорно-швартовный механизм.

Для цитирования: Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Рекомендации по определению мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартовного механизма // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 70-80. EDN CNRRAP

RECOMMENDATIONS FOR DETERMINING THE MATCHING TRANSFORMER POWER FOR ELECTRIC DRIVE OF ANCHOR-MOORING MECHANISM

S. V. Popov

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

O. A. Burmakin

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa_71@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

Y. S. Malyshev

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the issues of selecting the installed capacity of the matching transformer for the electric drive of the anchor-mooring mechanism in conditions of limited industrial series of 220 V winch electric drives. A model of the power supply system of the winch electric drive, including a power transformer and a ship generator, has been developed to study the influence of the electric drive starting processes on the ship's network. Various operating modes of the winch electric drive have been simulated and the results are presented. Diagrams of time, electrical and mechanical parameters of the electric drive depending on the ratio of the power of the matching transformer and the winch electric motor are presented. The analysis of the simulation results is carried out and comparative characteristics are constructed for a number of transformer capacities. Conclusions are made and recommendations are given for determining the power of the matching transformer taking into account the established requirements for the electric drive.

Keywords: anchor-mooring mechanism, matching transformer, ship electric drive, transient processes, transformer power, voltage quality.

For citation: S.V. Popov, O.A. Burmakin and Y.S. Malyshev, "Recommendations for determining the matching transformer power electric drive of anchor-mooring mechanism", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 70-80, 2025. EDN CNRRAP

1. Введение

В ряде случаев, в условиях ограниченного ряда мощностей электрических лебедок, при напряжении судовой сети 220 В, для обеспечения лучших энергетических и массогабаритных показателей более рациональным является применение якорно-швартовных механизмов (ЯШМ) работающих на напряжении 380 В [1-3].

Для согласования напряжений судовой сети и питания электроприводов палубных механизмов целесообразно использовать трехфазный трансформатор. Однако падение напряжения на трансформаторе негативно влияет на работу электродвигателя лебедки. На выбор величины установленной мощности согласующего трансформатора оказывают влияние: установленные мощности судового генератора и электродвигателя лебедки, коэффициент загрузки генератора на момент включения лебедки, а также допустимые величины напряжений на электродвигателе и время его разгона.

II. Методы и материалы

С целью определения мощности электрооборудования и параметров цепей электроснабжения лебедки разработана имитационная модель. Созданная имитационная модель для решения поставленной задачи подробно описана в [1, 4]. Вычисленные в результате математического моделирования значения параметров электродвигателя ЯШМ соответствуют справочным данным, используемого в модели электрооборудования, что подтверждает адекватность модели.

В результате моделирования получены переходные электрические и механические характеристики при работе электропривода в различных режимах (рис. 1), а именно:

- пуск электродвигателя,
- разгон электродвигателя до номинальной скорости,
- остановка электродвигателя под действием момента сопротивления,
- стоянка электродвигателя под током (зацепление якоря за грунт),
- разгон электродвигателя с постепенным снижением момента нагрузки на валу (отрыв якоря от грунта) [5-7].

Моделирование выполнено с генератором мощностью 60 кВА и подключенной к нему нагрузкой мощностью 40 кВА с $\cos\varphi=0.6$.

На рис. 1 показаны диаграммы параметров электродвигателя, полученные в результате моделирования. При пуске электродвигателя ($t = 0,3$ с) (рис. 1, а) наблюдаются колебательные процессы момента (рис. 1, б), связанные с электромагнитными и электромеханическими переходными процессами в электродвигателе и упругостью механической передачи, что отражается на колебаниях тока (рис. 1, в).

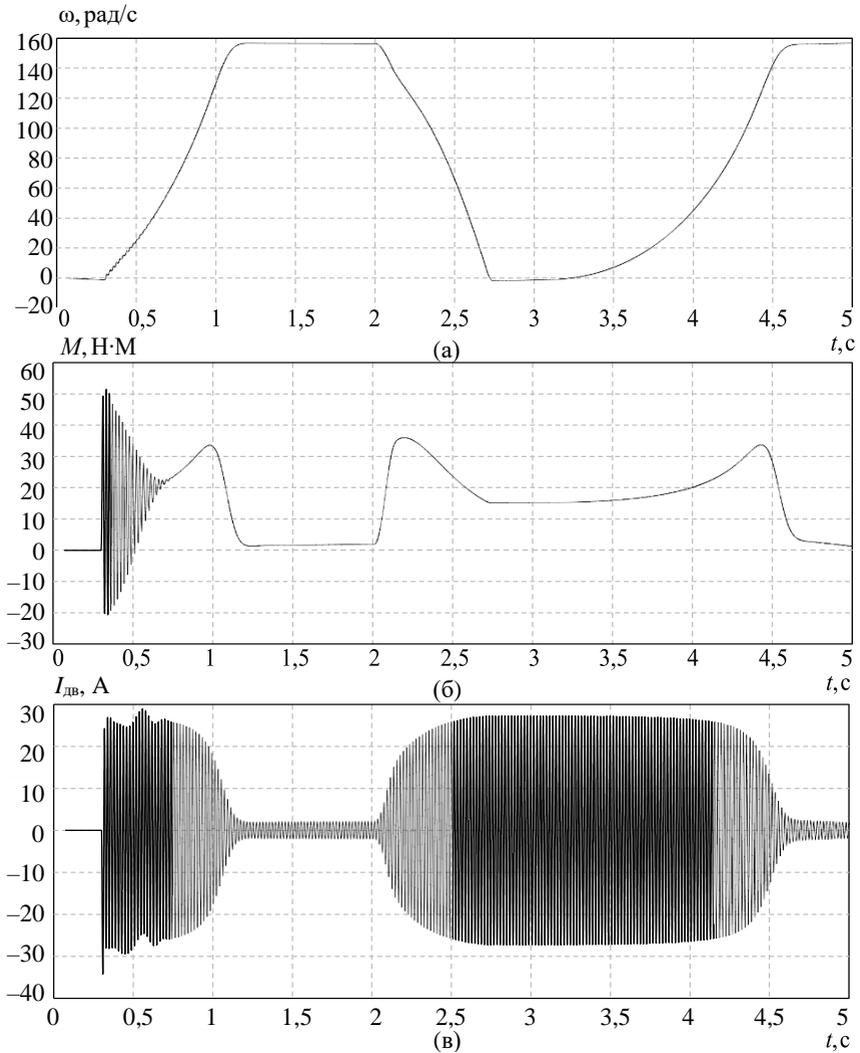


Рис. 1. Диаграммы скорости вращения (а), момента (б) и тока (в) электродвигателя ЯШМ

Fig. 1. Characteristics of rotation speed (a), torque (б) and current (в) of the electric motor of the anchor-mooring mechanism

На холостом ходу работы электродвигателя ток статора и момент на валу достигают установившихся значений ($t = 1,2$ с), а при увеличении момента сопротивления ток и момент увеличиваются. При превышении критического момента на валу электродвигателя ($t = 2,7$ с) происходит остановка электродвигателя и переход в режим стоянки под током ($t = 3,2$ с). Этот процесс характерен для якорно-швартовного механизма при отрыве якоря от грунта. Снижение момента сопротивления приводит к увеличению скорости электродвигателя до значений холостого хода ($t = 4,6$ сек.), что соответствует нагрузочной диаграмме ЯШМ.

III. Результаты

Для определения электрических и временных параметров при пуске/работе/торможении электропривода было выполнено моделирование судовой системы электроснабжения лебедки для различных соотношений мощности электродвигателя и мощности трансформатора. В результате моделирования были построены зависимости (рис. 2) для электродвигателей с номинальными мощностями 1,2 кВт (1,7 кВА) и 5 кВт (6,49 кВА).

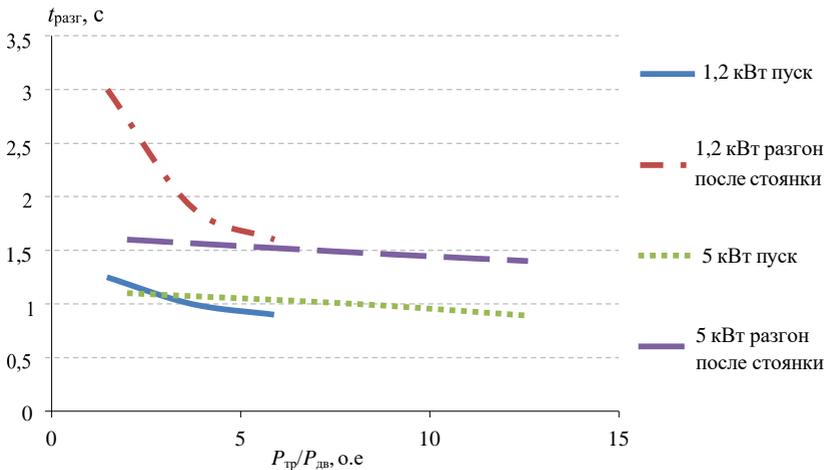


Рис. 2. Зависимость времени разгона от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 2. Dependence of acceleration time on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

Следует отметить, что зависимости построены при использовании относительного параметра соотношения мощностей согласующего трансформатора $P_{тр}$ и мощности электродвигателя лебедки $P_{дв}$, что позволяет оценить их кратность – во сколько раз мощность трансформатора $P_{тр}$

должна быть больше мощности электродвигателя $P_{дв}$ для достижения желаемого времени разгона $t_{разг}$. На рис. 2 приведены зависимости времени разгона электродвигателей мощностью 1,2 и 5 кВт при пуске от трансформаторов различной мощности и при отрыве якоря от грунта после стоянки под током. При моделировании трансформатор подключается к судовой сети с заранее подсоединенным к вторичной обмотке электродвигателем. Режимы работы ЯШМ задаются нагрузочной диаграммой в настройках блока *Repeating Sequence interpolated*. Согласно диаграммам, время разгона уменьшается при увеличении мощности трансформатора относительно мощности двигателя ЯШМ, что связано с уменьшением падения напряжения на выходе трансформатора при увеличении его мощности.

Время пуска до номинальной скорости для электродвигателей 1,2 и 5 кВт без использования трансформатора составляет 0,75 с и 0,5 с, а время разгона после стоянки под током и отрыва якоря от грунта – 1,3 с и 1 с, соответственно. Таким образом, обеспечение динамических временных характеристик, идентичных бестрансформаторному электроприводу, достигается применением трансформаторов в 10 – 12 раз, превышающих мощность электродвигателя. Однако для электроприводов ЯШМ не требуется такое высокое быстродействие, поэтому коэффициент соотношения установленных мощностей трансформатора и электродвигателя может быть уменьшен.

Напряжение питания электродвигателя оказывает значительное влияние на его механические характеристики [8-10], поэтому необходимо определить значение максимального падения напряжения на обмотке статора электродвигателя. Например, исходя из правил Российского классификационного общества (РКО), допустимый кратковременный провал напряжения может составлять 20 % от номинального значения, а падение напряжения на линии питания для электродвигателей переменного тока не должно превышать 10% от номинального значения.

В результате моделирования получены зависимости падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора при пуске предварительно загруженного до номинального значения электродвигателя и стоянке под током. На основании, которых построены кривые показывающие зависимости (рис. 3) при изменении коэффициента соотношения мощностей электродвигателя и трансформатора.

Исходя из зависимостей падения напряжения, можно сделать вывод, что для обеспечения указанных условий коэффициент соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя будет составлять от 2 до 4-х крат, однако при увеличении мощности электропривода увеличивается падение напряжения судовой электросети, что так же следует учитывать при проектировании.

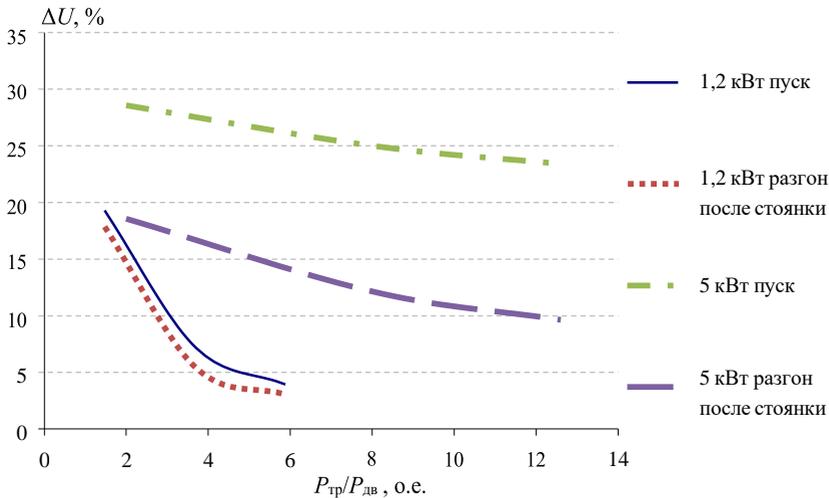


Рис. 3. Зависимость провала напряжения на вторичной обмотке трансформатора при разгоне электродвигателя от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 3. Dependence of the voltage drop on the secondary winding of the transformer during acceleration of the electric motor on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

По требованиям правил РКО режим стоянки под током должен быть обеспечен в течение не менее 30 с. Стоянка под пусковым током вызывает падение напряжения на обмотках трансформатора, что приводит к необходимости завышения мощности трансформатора с целью поддержания пускового момента на валу электродвигателя в течение установленного времени [10]. Было проведено моделирование режимов стоянки электродвигателя с пусковым током для различных мощностей трансформаторов, в результате которого были построены зависимости (рис. 4). Анализ характеристик рис. 4 показал, что зависимости пускового и критического моментов от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и двигателя в диапазоне от двух до семи крат имеют практически прямолинейный характер. При этом критический момент в указанном диапазоне возрастает на 15 %, а пусковой на 20 %, что имеет существенное значение для работы и обеспечения требуемых характеристик электропривода. При дальнейшем увеличении коэффициента соотношения мощностей трансформатора и двигателя прирост пускового и критического моментов уменьшается, что говорит о снижении влияния мощности трансформатора на момент двигателя.

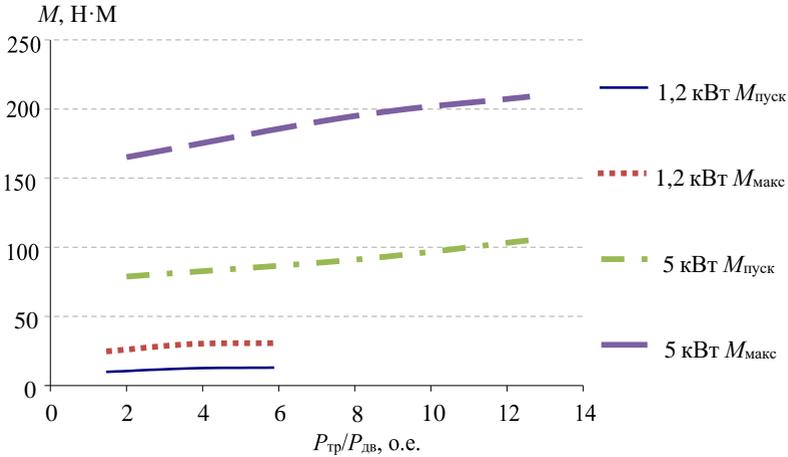


Рис. 4. Зависимость пускового и критического моментов ЭД от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 4. Dependence of the starting and critical moments of the electric motor on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

IV. Заключение

Учитывая результаты моделирования, можно сделать вывод, что мощность согласующего трансформатора может быть определена исходя из требуемых критериев, как временных и тяговых с одной стороны, так и показателей качества судовой электроэнергетики с другой. Предложенные зависимости, построенные в результате варьирования различных параметров модели, могут быть полезными на практике при проектировании систем ЯШМ и выборе мощности согласующего трансформатора при установленной мощности электропривода лебедки в диапазоне от 1,2 до 5 кВт.

Особый интерес возникает при решении задачи стабилизации напряжения на электроприводе в режиме работы с заторможенным ротором и его влияние на судовую сеть. Практическую ценность результатов исследования обосновывает работу над усовершенствованием имитационной модели.

© Попов С.В., 2025

© Бурмакин О.А., 2025

© Малышев Ю.С., 2025

Поступила в редакцию 30.08.2024

Принята к публикации 12.11.2024

Received 30.08.2024

Accepted 12.11.2024

Библиографический список

- [1] Мальшев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В. Имитационная модель пусковой установки по системе трансформатор-асинхронный двигатель для якорно-швартовых механизмов // II Межд. науч.-промыш. форум «Транспорт. Горизонты развития», Июнь 07-09, 2022, Нижний Новгород, Россия. Н. Новгород: ВГУВТ, 2022. С. 30.
- [2] Бурков А.Ф., Веревкин В.Ф., Радченко П.М. Повышение энергоэффективности морского транспорта и транспортной инфраструктуры. С.-Пб.: Лань, 2019. – 132 с.
- [3] Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Лабутин А.А. Рынки электрических машин и аппаратов: динамика и основные тенденции // РУМ. 2020. № 4 (594). С. 44-51.
- [4] Попов С.В., Бурмакин О.А., Мальшев Ю.С. Имитационная модель электропривода якорной лебедки, работающей от судовой электростанции через согласующий трансформатор, Свид. 2024662262 RU, заявл. 08.05.24; опубл. 27.05.24. – Бюл. № 6.
- [5] Правила классификации, постройки и освидетельствования судов ВВП, судов смешанного (река – море) плавания, плавучих объектов // ФАУ «Российское классификационное общество». [Электронный ресурс]. URL: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-uriditelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> (дата обращения 20.05.2024).
- [6] Бурков А.Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов. С.-Пб.: Лань, 2023. – 340 с.
- [7] Токарев П.Н. Стоянка судна на якоре в стесненных путевых условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 78 (1). С. 234-244. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [8] Бурков А.Ф., Нгуен В. Теоретические положения технической эксплуатации для определения надежности судовых электроприводов // Надежность и безопасность энергетики. 2023. № 16 (3). С. 184-191. DOI: 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191
- [9] Бурков А.Ф., Миханошин В.В., Нгуен В.Х. Повышение энергетической эффективности асинхронных электроприводов // Электрооборудование: Эксплуатация и Ремонт. 2021. № 11. С. 7-11.
- [10] Савенко А.Е., Савенко П.С. Исследование работы мощного электропривода в автономном электротехническом комплексе // Вестник ИГЭУ. 2017. № 4. С. 44-49.

References

- [1] Yu.S. Malyshev, O.A. Burmakin and S.V. Popov, “Simulation model of the launcher according to the transformer asynchronous motor system for anchor-mooring mechanisms”, in proc. *II Int. Scientific and Industrial Forum “Transport. Development Horizons”*, Jun. 07-09, 2022, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 30.
- [2] A.F. Burkov, V.F. Verevkin and P.M. Radchenko, *Povyshenie energoeffektivnosti morskogo transporta i transportnoj infrastruktury [Improving the energy efficiency of maritime transport and transport infrastructure]*. St. Petersburg: Lan’, 2019 (in Russian).

- [3] R.N. Shulga, A.Yu. Petrov and A.A. Labutin, “Rynki elektricheskix mashin i apparatov: dinamika i osnovnye tendencii [The markets of electric machines and apparatuses: dynamics and main trends]”, *RUM*, vol. 4, no. 594, pp. 44-51, 2020 (in Russian).
- [4] S.V. Popov, O.A. Burmakin and Yu.S. Malyshev, “Imitatsionnaya model' elektroprivoda yakornoj lebedki, rabotayushchey ot sudovoy elektrostantsii cherez so-glasuyushchiy transformator [Simulation model of the electric drive of an anchor winch operating from a ship power station through a matching transformer]”, Certificate RU 2024662262, May 27, 2024 (in Russian).
- [5] Pravila klassifikatsii, postroyki i osvidetel'stvovaniya sudov VVP, sudov sme-shannogo (reka-more) plavaniya, plavuchikh ob"yektov [Rules for the classification, construction and inspection of inland water navigation vessels, mixed (river-sea) navigation vessels, floating objects]. [Online]. Available at: <https://rfclass.ru/izdaniyaruko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-sme-shannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> [Accessed: May. 20, 2024] (in Russian).
- [6] A.F. Burkov, *Osnovy teorii i ekspluatatsii sudovykh elektroprivodov [Fundamentals of the theory and operation of ship electric drives: a textbook for universities]*. St. Petersburg: Lan', 2023 (in Russian).
- [7] P.N. Tokarev, “The anchorage in cramped travel conditions”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 78, no. 4, pp. 234-244, 2024. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [8] A.F. Burkov and V. Nguen, “Theoretical provisions on operation and maintenance for determining the reliability of ship electric drives”, *Safety and Reliability of Power Industry*, vol. 16, no. 3, pp. 184-191, 2023. DOI: 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191
- [9] A.F. Burkov, V.V. Mikhailoshin and V.H. Nguyen, “Improving the energy efficiency of asynchronous electric drives”, *Electrical Equipment: Operation and Repair*, vol. 11, pp. 7-11, 2021.
- [10] A.E. Savenko and P.S. Savenko, “Research into powerful electric drives in the autonomous electrical power complex”, *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, vol. 4, pp. 44-49, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бурмакин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg A. Burmakin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Мальшев Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Yurii S. Malyshev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.