

Е. М. Бурда, О. С. Хватов, И. А. Тарпанов, Н. И. Киталтный

ВАРИАНТ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КОЛЕСНОГО СУДНА С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

Рассматриваются условия работы судовой единой электростанции с гребными электродвигателями колесного судна. Эксплуатация судов с колесным движительно-рулевым комплексом показала их высокую экономичность и маневренность. Однако при эксплуатации были выявлены существенные недостатки: неравномерное и быстроизменяющееся распределение мощности между гребными электродвигателями при активном маневрировании; сложность включения генераторов на параллельную работу, связанная с наличием высших гармонических составляющих в сети при работе преобразователей частоты. Решение данной проблемы заключается в использовании псевдопараллельной работы генераторов только на гребные электродвигатели, в то время как остальные потребители получают питание только от тех генераторов, к которым они подключены. Для этого необходимо соединить преобразователи частоты, работающие на гребные электродвигатели на стороне постоянного тока. Разница во внешних характеристиках выпрямителей и генераторов может привести к неравномерному распределению нагрузки между генераторами. Для решения проблемы предлагается использовать регуляторы нагрузки, воздействующие на регуляторы напряжения генераторов. Представлены математическая и имитационная модели судовой электростанции с гребной электроустановкой и общим звеном постоянного тока, графики переходных процессов при пуске электродвигателя, включении регуляторов мощности. Анализ результатов показал: быстродействие системы распределения нагрузки существенно выше темпа изменения режимов работы гребного колеса. Приведенная система позволяет выровнять загрузку генераторов при невозможности их включения на параллельную работу.

Ключевые слова: электростанция, преобразователь частоты, распределитель мощности, звено постоянного тока.

Состояние проблемы

В последнее время в Нижегородской области ведется строительство и ввод в эксплуатацию мелкосидящих пассажирских судов с колесным движительно-рулевым комплексом (ДРК). Конструкция колесного ДРК обеспечивает изменение величины и направления вектора тяги путем изменения соотношения числа оборотов и направления вращения гребных колес.

Одним из вариантов энергетической установки судов с ДРК может быть единая электростанция, содержащая два дизель-генератора (ДГ), которые обеспечивают питание как гребной электрической установки (ГЭУ), так и общесудовых потребителей. В качестве электроприводов гребных колес используются частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с преобразователями частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока.

Эксплуатация таких судов (проект ПКС-40) [1, 2] показала их высокую экономичность и маневренность. Однако при эксплуатации были выявлены следующие существенные недостатки:

- неравномерное и быстроизменяющееся распределение мощности между гребными электродвигателями при активном маневрировании;
- сложность включения генераторов на параллельную работу, связанная с наличием высших гармонических составляющих в сети при работе ПЧ.

Установлено, что при определенных режимах один из двигателей ГЭУ может быть загружен на 150–170 % от номинальной мощности, а другой существенно недогружен. Если для ПЧ и электрических двигателей данные перегрузки не являются критичными, то для ДГ они могут быть недопустимыми. Перегрузка генераторов может составлять не более 10–15 % от их номинальной мощности. При перегрузке ДГ может наблюдаться провал напряжения, что приводит к значительному увеличению потребляемого тока и, как следствие, отключению ПЧ под действием токовой защиты. При восстановлении напряжения ПЧ автоматически включается, но перерыв в питании может повлиять на безопасность при маневрировании судна. Устанавливать ДГ избыточной мощности экономически нецелесообразно, т. к. это приводит к повышенному расходу топлива и одновременному увеличению массогабаритных показателей оборудования.

Постановка задачи

Для решения указанной проблемы предлагается использование псевдопараллельной работы генераторов только на гребные электродвигатели. Для этого необходимо соединить ПЧ по контуру постоянного тока и равномерно распределить нагрузку между выпрямителями ПЧ. Остальные потребители на судне при этом получают питание от генераторов, к которым они подключены. Отметим, что мощность, необходимая для канала электродвижения, составляет до 75 % от мощности судовой электростанции [1–3].

На рис. 1 представлена функциональная схема единой электростанции судна для варианта псевдопараллельной работы генераторов.

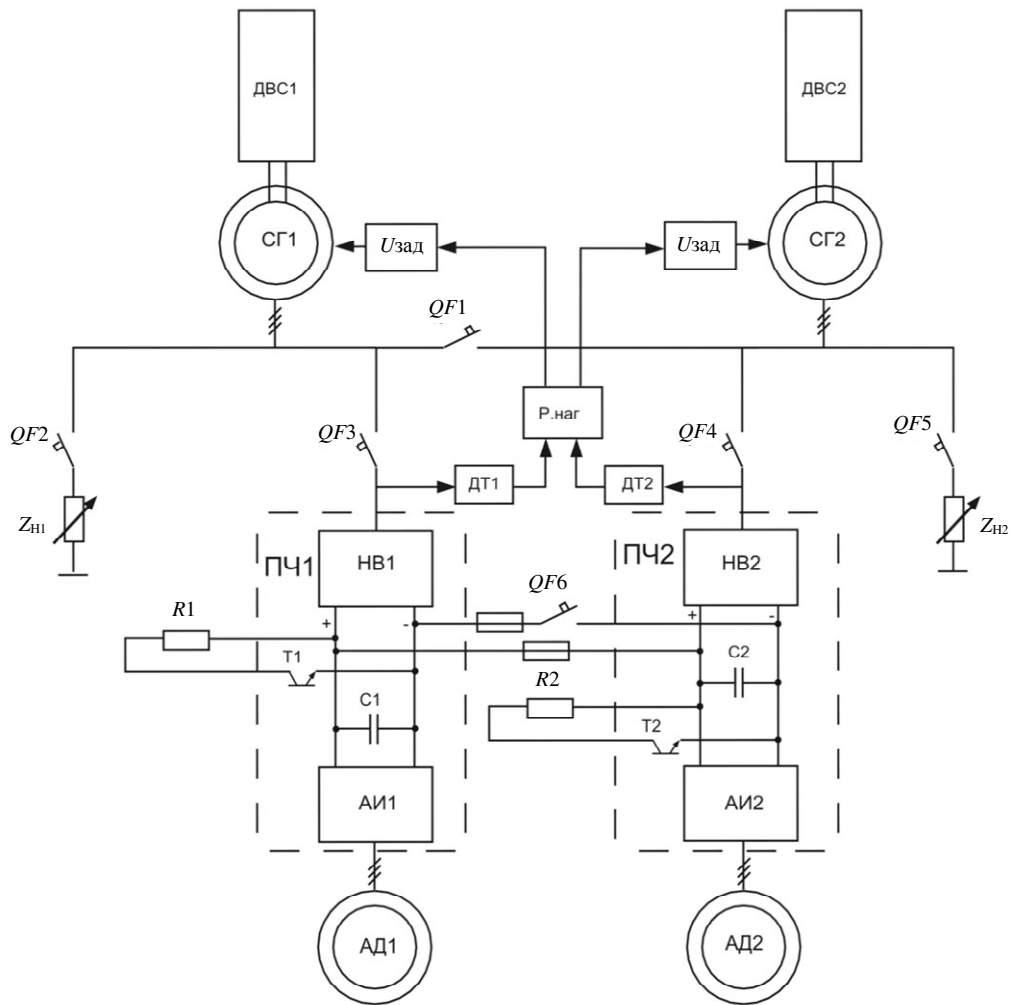


Рис.1. Функциональная схема единой электростанции судна

В состав электростанции входят два синхронных генератора СГ1 и СГ2 с первичными двигателями внутреннего сгорания ДВС1 и ДВС2, преобразователи частоты ПЧ1 и ПЧ2, работающие на гребные электродвигатели АД1 и АД2 и общесудовая нагрузка $Z_{н1}$ и $Z_{н2}$. Преобразователи частоты соединены на стороне постоянного тока. Таким образом, инверторы ПЧ питаются от одного общего источника постоянного тока, а нагрузка, создаваемая гребными электродвигателями, равномерно распределяется между генераторами, что улучшает динамические показатели ГЭУ. Датчики тока ДТ1 и ДТ2 измеряют величины тока на входе выпрямителей и с помощью распределителя нагрузки $P_{наг}$ воздействуют на регуляторы возбуждения СГ, изменяя амплитуду напряжения на выходе генераторов, что позволяет добиться равномерного распределения нагрузки.

Равномерное распределение нагрузки между выпрямителями возможно только при одинаковой жесткости их внешних характеристик и при равенстве амплитуд напряжения на их входах.

Очевидно, что жесткость внешних характеристик выпрямителей НВ1 и НВ2 (рис. 1) отличается, что отразится на их неравномерной токовой нагрузке, которая, с учетом возможной разницы величин напряжений на входах выпрямителей, может составлять от 30 до 100 % (рис. 2).

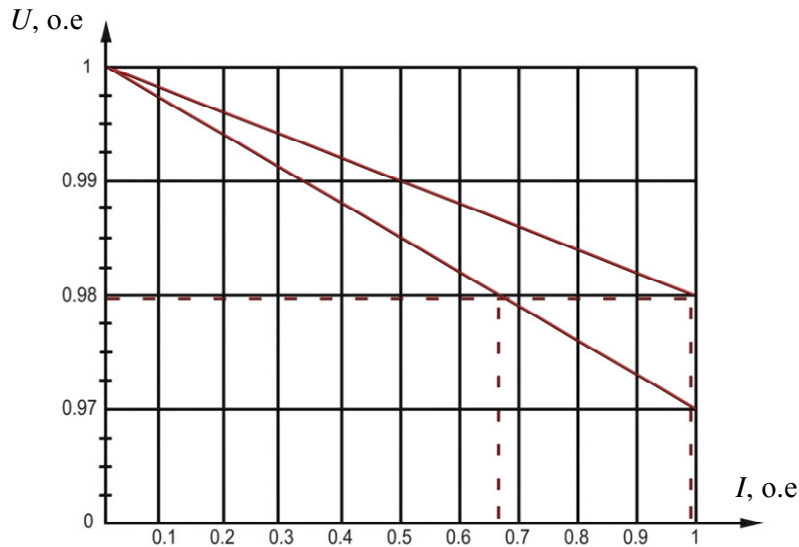


Рис. 2. Внешние характеристики неуправляемых выпрямителей в относительных единицах:
 U – напряжение выпрямителя; I – ток выпрямителя

Методы и результаты исследования

Нами разработана имитационная модель единой электростанции судна с ГЭУ и общим звеном постоянного тока (рис. 3). При построении модели использовались системы дифференциальных уравнений синхронного генератора и асинхронного двигателя [4] и методика моделирования в системе MATLAB [5].

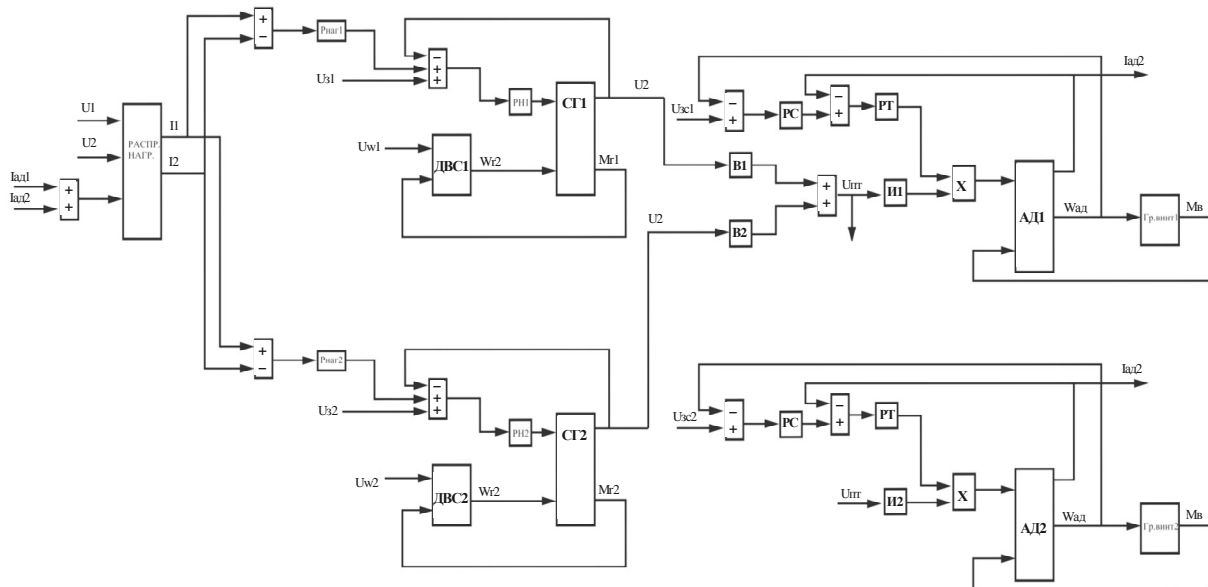


Рис. 3. Структурная схема математической модели электростанции с гребной электроустановкой и общим звеном постоянного тока

Модель содержит следующие блоки: ДВС1 и СГ1, ДВС2 и СГ2 – ДГ судовой электростанции; АД1 и АД2 – электродвигатели гребные колеса, В1 и В2, И1 и И2 – неуправляемые выпрямители и инверторы ПЧ; $P_{наг1}$, $P_{наг2}$ – регуляторы нагрузки генераторов; Гр.винт1 и Гр.винт2 – гребные колеса

Модели электрических машин выполнены на базе уравнений Парка – Горева в системе синхронно вращающихся координат. Неуправляемые выпрямители и инверторы ПЧ представлены инерционными звеньями. В математическом описании регуляторов нагрузки генераторов учитываются внешние характеристики выпрямителей. Гребные колеса в модели представлены в виде вентиляторной нагрузки на валу АД.

На рис. 4 представлены временные зависимости величины токов генераторов при плавном пуске одного из гребных электродвигателей, а также при включении системы распределения нагрузки. Неравномерность распределения нагрузки обусловлена разницей во внешних характеристиках выпрямителей.

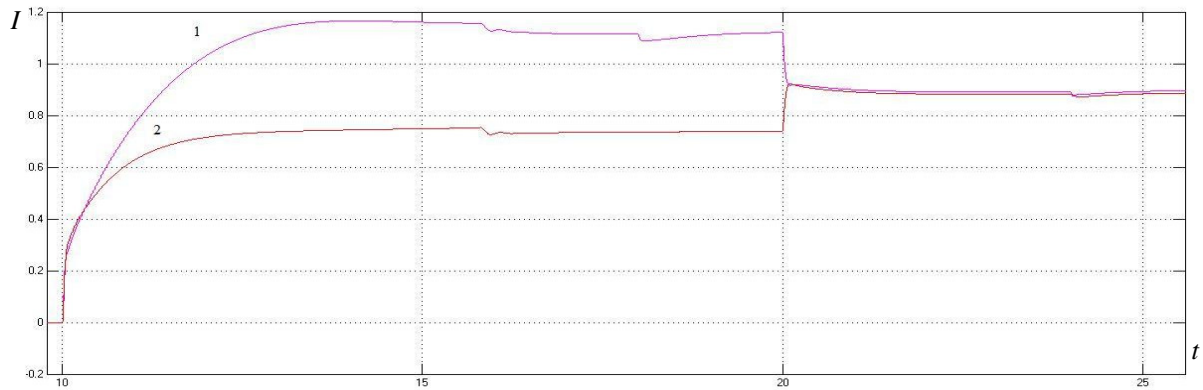


Рис. 4. Зависимость $I_1(t)$, $I_2(t)$ при подключении нагрузки ($t = 10$ с) и включении регуляторов нагрузки ($t = 20$ с)

Анализ результатов моделирования дает основания утверждать, что при запуске ГЭУ из-за разницы внешних характеристик выпрямителей нагрузка между генераторами распределяется неравномерно. Разница токов достигает 35 %. При использовании системы распределения нагрузки, выполненной на основе пропорциональных регуляторов, разница величины токов генераторов снижается до уровня статической ошибки регуляторов (1,5–2 %).

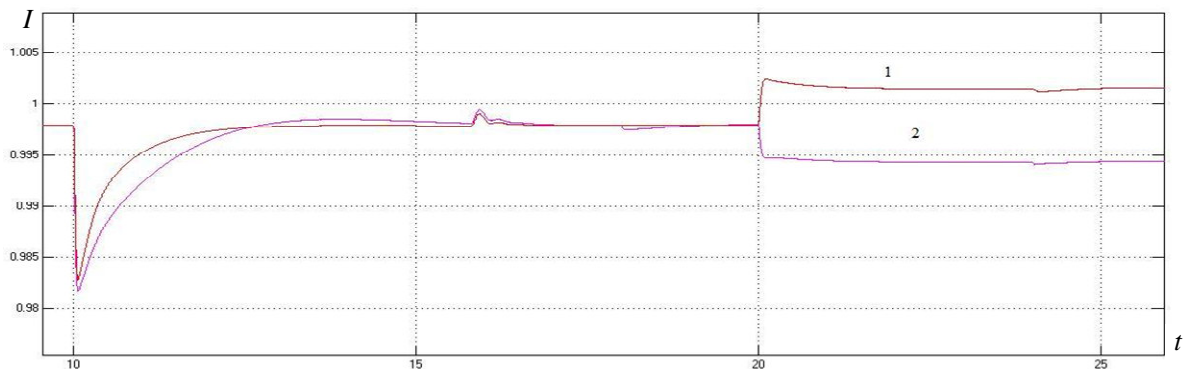


Рис. 5. Временные зависимости величины напряжений на выходе генераторов

На рис. 5 видно, что после включения системы распределения нагрузки напряжение на выходе генератора, имеющего на шинах выпрямитель ПЧ с более жесткой внешней характеристикой, незначительно снижается (график 2), а на шинах другого генератора увеличивается.

Разгон гребного двигателя происходит по заданной S-образной кривой до включения системы распределения нагрузки (рис. 6).

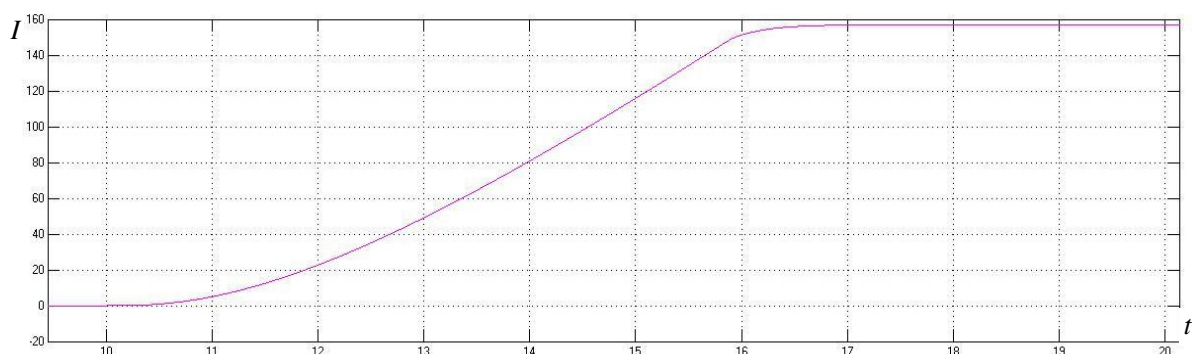


Рис. 6. Разгон гребного электродвигателя

Из приведенных зависимостей видно, что быстродействие системы распределения нагрузки существенно выше темпа изменения режимов работы гребного колеса.

Заключение

Предложенный вариант единой электростанции колесного судна с электродвижением позволяет выровнять загрузку генераторов при невозможности их включения на параллельную работу. За счет соединения преобразователей частоты по цепи постоянного тока, а также применения системы регулирования тока возбуждения синхронных машин решена задача равномерного распределения мощности между параллельно работающими генераторами, с учетом разницы в статизме внешних характеристик выпрямителей и генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хватов О. С.* Единая электростанция колесного судна с электродвижением типа «Сура» / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, И. А. Гарпанов // Вестн. Волж. гос. акад. водн. транспорта. 2015. Вып. 44. С. 205–213.
2. *Бурда Е. М.* Система электродвижения пассажирского судна «Сура-2» / Е. М. Бурда // Тр. 15-го Междунар. промышл. форума «Великие реки-2013» (Нижний Новгород, 15–18 мая 2013 г.). Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. Т. 2. С. 386–388.
3. *Хватов О. С.* Электропривод гребной электрической установки колесного судна / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, Г. И. Коробко, И. Г. Коробко // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. (Саранск, 7–9 октября 2014 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т. 2. С. 226–230.
4. *Ковач К. П.* Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. М. Рац. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
5. *Герман-Галкин С. Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.

Статья поступила в редакцию 26.02.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурда Евгений Мордкович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; Burda1951@mail.ru.

Хватов Олег Станиславович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; khvatov_oleg@mail.ru.

Тарпанов Илья Александрович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук; старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; Fillin2003@mail.ru.

Кшталтный Николай Иванович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; kshtaltny@rivregnn.ru.



E. M. Burda, O. S. Khvatov, I. A. Tarpanov, N. I. Kshaltnyi

TYPE OF THE INTEGRAL POWER STATION OF WHEELED VESSEL WITH ELECTRIC PROPULSION

Abstract. The paper considers the operational conditions of the marine integral power station with propulsion electric engine of the wheeled vessel. The operation of ships with wheel propulsion complex has shown its high efficiency and maneuverability. However, during operation there were revealed the following significant shortcomings: irregular and rapidly changing power split between the propeller motors during active maneuvering; the complexity of the inclusion of generators for parallel operation associated with the presence of higher harmonics in the network during operating frequency converters. The solution of this problem is in pseudo-parallel operation of generators feeding only motors, while the rest of the consumers are fed only the by generators to which they are connected. For this purpose, it is necessary to connect frequency converters, working on the propeller motors on the direct current side. The difference in the external characteristics of rectifiers and generators may lead to an uneven distribution of load between the generators. To solve this problem is offered to use the load regulators acting on the voltage regulators of generators. The article presents mathematical and simulation models of ship power plant with wheel propulsion electrical complex with a common DC link, graphs of transient processes of starting motor and turning on power regulators. The analysis of the results showed that the operating speed of the load distribution system is significantly higher than speed of changes in the modes of operation of wheel propulsion complex. The system allows to align the loading of generators in case of impossibility of their parallel work.

Key words: power station, frequency converter, power control, DC-link.

REFERENCES

1. Khvatov O. S., Burda E. M., Tarpanov I. A. Edinaia elektrostantsiia kolesnogo sudna s elektrodvizheniem tipa «Sura» [Integral power station of the wheeled vessel with electric propulsion like "Sura"]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2015, iss. 44, pp. 205–213.
2. Burda E. M. Sistema elektrodvizheniia passazhirskogo sudna «Sura-2» [Electric propulsion system of the passenger ship "Sura-2"]. *Trudy 15-go Mezhdunarodnogo promyshlennogo foruma «Velikie reki-2013» (Nizhnii Novgorod, 15–18 maia 2013 g.)*. Nizhniy Novgorod, Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2013, iss. 2, pp. 386–388.
3. Khvatov O. S., Burda E. M., Korobko G. I., Korobko I. G. Elektroprivod grebnoi elektricheskoi ustanovki kolesnogo sudna [Electric drive of propulsive electric complex of the wheeled vessel]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 (Saransk, 7–9 oktiabria 2014 g.)*. Saransk, Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2014, iss. 2. Pp. 226–230.
4. Kovach K. P., Rats I. M. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transmission processes in DC machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 744 p.
5. German-Galkin S. G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer modeling of semiconducting systems in MATLAB 6.0]. Saint-Petersburg, Korona print Publ., 2001. 320 p.

The article submitted to the editors 26.02.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burda Evgeniy Mordcovich – Russia, 603950, Nizhniy Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department "Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport"; Burda1951@mail.ru.

Khvatov Oleg Stanislavovich – Russia, 603950, Nizhniy Novgorod; Volga State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department "Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport"; khvatov_oleg@mail.ru.

Tarpanov Ilya Aleksandrovich – Russia, 603950, Nizhniy Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Sciences; Senior Lecturer of the Department "Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport"; Fillin2003@mail.ru.

Kshtalnyi Nicolay Ivanovich – Russia, 603950, Nizhniy Novgorod; Volga State University of Water Transport; "Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport"; kshtalnyi@rivregnn.ru.

