

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100  
УДК 621.311.61

## СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ОБРАТИМОЙ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ ПО СХЕМЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

*О. С. Хватов, И. А. Тарпанов, П. В. Кузнецов*

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Анализ режимов работы некоторых проектов судов небольшого водоизмещения свидетельствует: большую часть рабочего времени суда находятся в режиме ожидания либо передвигаются малым ходом. Работа главных судовых дизельных двигателей проходит при загрузке 10–15 % (максимум 20 %), что негативно отражается на эксплуатационных показателях: не успевают прогреться масло и водяная рубашка двигателя, повышается расход топлива и масла. Происходит коксование поршневых колец, интеркулеров и других узлов, что приводит к резкому снижению ресурса главного судового двигателя. В целях устранения недостатков при работе главных двигателей в режимах долевого нагружения рассматривается возможность использования судовой валогенераторной установки в качестве гребной электрической установки во время продолжительной работы судна на малых ходах и при маневрировании. Подобный вариант валогенераторной установки можно назвать обратимой валогенераторной установкой (ОВГУ), способной работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Питание ОВГУ и общесудовых потребителей при этом целесообразно осуществлять от дизель-генераторной установки, которая может быть реализована как дизель-генераторная установка переменной частоты вращения с целью экономии топлива. Представлен вариант ОВГУ на основе асинхронной машины с фазным ротором и преобразователем частоты в роторе (машина двойного питания). Приведены функциональная и структурная схемы судовой электроэнергетической системы на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения и пропульсивной системы на основе ОВГУ по схеме машины двойного питания. В прикладной программе Matlab разработаны имитационные модели и представлены результаты имитационного моделирования режимов работы вышеуказанных систем.

**Ключевые слова:** обратимая валогенераторная установка, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, машина двойного питания, судовая электроэнергетическая система, преобразователь частоты.

**Для цитирования:** Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кузнецов П. В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 93–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100.

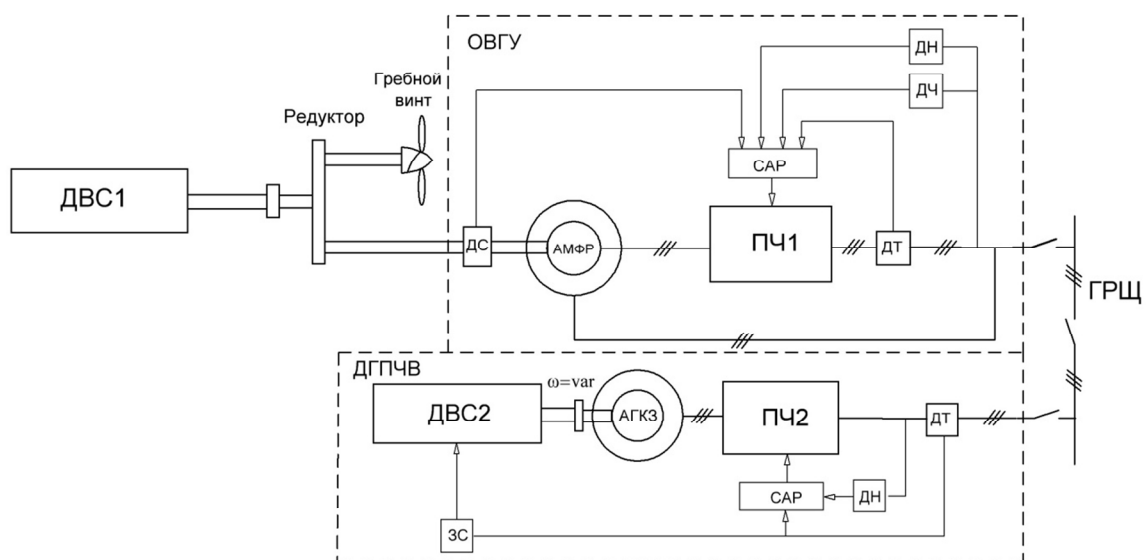
### **Введение**

Особенность обратимой валогенераторной установки (ОВГУ) заключается в ее способности работать в качестве гребной электрической установки на низких скоростях движения судна [1]. Установленные на судне дизель-генераторы (ДГ) обеспечивают электрической энергией ОВГУ и общесудовые потребители. Главная энергетическая установка при этом не используется. С целью повышения энергоэффективности при работе ДГ целесообразно одну из генераторных установок перевести в режим переменной частоты вращения, т. е. реализовать машинно-

вентильный вариант дизель-генераторной установки переменной частоты вращения (ДГПЧВ) [2–4]. Необходимо отметить, что ОВГУ выступает в роли не основной, а вспомогательной пропульсивной установки судна. Продолжительный ход судна с максимальной скоростью обеспечивается главной энергетической установкой и питанием общесудовых потребителей от ОВГУ. В штормовых условиях питание общесудовых потребителей осуществляют ДГ, а ОВГУ отключается.

**Функциональная схема судовой электроэнергетической системы с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения и обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания**

Валогенераторные установки являются генераторными комплексами переменной частоты вращения. Требование стабилизации параметров генерируемой электроэнергии (амплитуды и частоты напряжения) у современных валогенераторных установок обеспечивается средствами полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ). При использовании в составе валогенераторной установки электрического генератора синхронного типа ПЧ подключен к статорным обмоткам синхронного генератора и, следовательно, его установленная мощность определяется полной мощностью синхронного генератора. При использовании в качестве электрического генератора в составе валогенераторной установки асинхронной машины, как альтернативного типа, можно получить ряд преимуществ как в плане надежных и стоимостных показателей (для асинхронного короткозамкнутого генератора), так и по установленной мощности силового электрооборудования (для варианта машины двойного питания (МДП)). Для варианта валогенераторной установки по схеме МДП мощность ПЧ, который подключен к роторной цепи асинхронного генератора с фазным ротором, определяется мощностью скольжения и, как правило, существенно меньше мощности ПЧ в статоре синхронного генератора. В настоящем исследовании рассмотрен вариант ОВГУ на основе МДП. Отметим, что МДП обладает хорошими регулировочными возможностями и особенно перспективна при широком диапазоне изменения скорости вращения вала, когда к мощности, генерируемой через статор, добавляется мощность скольжения [5, 6]. На рис. 1 представлена функциональная схема судовой электроэнергетической системы с ДГПЧВ и ОВГУ на основе МДП.



- |   |   |
|---|---|
| ДВС1, ДВС2 - двигатели внутреннего сгорания             | ДЧ - датчик частоты                         |
| ПЧ1, ПЧ2 - преобразователи частоты                      | ДН - датчики напряжения                     |
| АМФР - асинхронная машина с фазным ротором              | ДТ - датчики тока                           |
| АГКЗ - асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором | ЗС - задатчик скорости                      |
| ГРЩ - главный распределительный щит                     | САР - системы автоматического регулирования |

Рис. 1. Функциональная схема судовой электроэнергетической системы с ДГПЧВ и ОВГУ на основе МДП

Проведем математическое описание элементов силового оборудования электроэнергетической системы (рис. 1): ДГПЧВ, ОВГУ и нагрузки (винт). Поскольку мы исследуем двигательный режим работы ОВГУ при отключенном главном судовом дизельном двигателе, то его математическое описание не приводим.

**Моделирование режимов работы судовой электроэнергетической системы с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения и обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания**

Математическая модель ДГПЧВ на основе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором представлена следующими уравнениями системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} T \frac{dy_0}{dt} = x_0 - \mu; \\ U_1 = r(1 + T'_s s) i_{sx} - \omega_1 L'_s i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Rx} - k_R p \omega_m \Psi_{Ry}; \\ 0 = r(1 + T'_s s) i_{sy} + \omega_1 L'_s i_{sx} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Ry} - k_R p \omega_m \Psi_{Rx}; \\ 0 = -k_R R_R i_{sx} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx} - (p \omega_m - \omega_1) \Psi_{Ry}; \\ 0 = -k_R R_R i_{sy} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Ry} + s \Psi_{Ry} - (p \omega_m - \omega_1) \Psi_{Rx}; \\ m = K_R (\Psi_{Rx} i_{sy} - \Psi_{Ry} i_{sx}) + J s \omega_m. \end{array} \right. \quad (1)$$

Первое уравнение системы (1) описывает дизельный двигатель, последующие – асинхронную короткозамкнутую машину. В качестве ПЧ в составе ДГПЧВ предлагается использовать ПЧ на основе активного выпрямителя напряжения (ПЧ2), что позволяет отказаться от необходимости использования отдельных конденсаторных устройств для возбуждения асинхронного генератора [7, 8]. Отметим, что все обозначения в уравнениях системы (1) являются общепринятыми в теории двигателей внутреннего сгорания и электрических машин [9].

В дальнейшем при исследовании динамических режимов работы активное сопротивление статорных обмоток и изменение потокосцепления в статоре асинхронной машины (трансформаторная электродвижущая сила статора) не учитывались. Данные допущения являются известными и общепринятыми в теории асинхронных машин при анализе динамических режимов их работы [5, 10]. Как объект управления, АГКЗ имеет два взаимосвязанных канала: канал по оси  $x$  определяет активную составляющую тока статора, канал по оси  $y$  – реактивную составляющую тока статора. По условию настройки на модульный оптимум определена передаточная функция регулятора в контуре стабилизации амплитуды генерируемого напряжения ДГПЧВ.

Математическое описание ОВГУ на основе МДП представлено уравнениями асинхронной машины с фазным ротором, записанными в синхронно вращающейся системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{Rx} = r(1 + T'_R p) i_{Rx} - (\omega_K - p \omega_m) L'_R i_{Ry} - \frac{k_s}{T_s} \Psi_{sx}; \\ U_{Ry} = r(1 + T'_R s) i_{Ry} + (\omega_K - p \omega_m) L'_R i_{Rx} - k_s p \omega_m \Psi_{sx}; \\ U_{sx} = -k_s R_s i_{Rx} + \frac{1}{T_s} \Psi_{sx} + p \Psi_{sx}; \\ U_{sy} = -k_s R_s i_{Ry} + \omega_K \Psi_{sx}; \\ m = K_R \Psi_{sx} i_{Ry}; \\ J p \omega_m = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2)$$

Все обозначения в уравнениях системы (2) являются общепринятыми в теории электрических машин [9].

Построение системы управления для двигательного режима ОВГУ на основе МДП по асинхронному принципу работы основано на раздельном управлении по двум каналам. В качестве первого канала используется канал регулирования частоты вращения, который по своей структуре является двухконтурным, где внешнему контуру частоты вращения (главный регулируемый параметр) подчинен контур активного тока статора. Второй канал реактивного тока статора является одноконтурным. Также предусмотрены контуры регулирования фазного тока ротора (по токам ПЧ в роторе). По правилам методики последовательной коррекции при настройке переходных процессов в контурах регулирования на модульный и симметричный оптимумы получены передаточные функции соответствующих регуляторов [5, 6].

В качестве двигательной нагрузки представлен винт, величина вращающего момента которого определяется его геометрической формой при постоянной скорости набегающего потока, а также зависит от рода жидкости, в которой работает винт и от скорости его вращения:

$$M = K_2 \rho n^2 D^5,$$

где  $D$  – диаметр винта;  $\rho$  – плотность воды;  $n$  – скорость вращения винта;  $K_2$  – коэффициент момента винта.

Для исследования динамических режимов работы судовой электроэнергетической системы (см. рис. 1) в программном пакете Matlab получена ее имитационная модель (рис. 2).

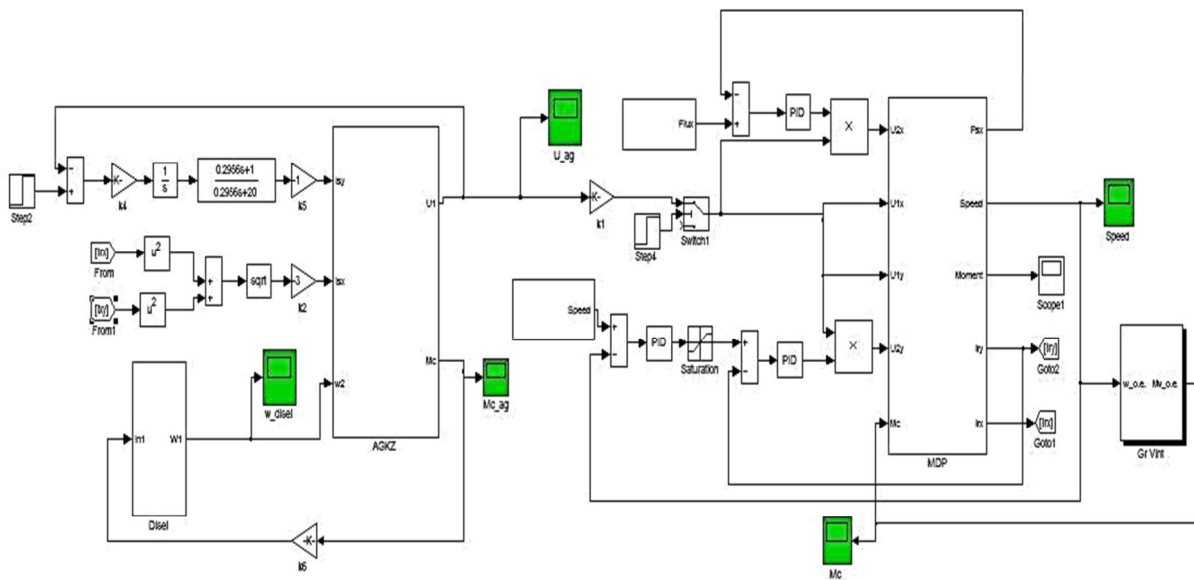


Рис. 2. Имитационная модель судовой электроэнергетической системы с ДГПЧВ и ОВГУ на основе МДП

На рис. 3 представлены временные зависимости изменения частоты вращения вала  $\omega(t)$  (рис. 3, а) и вращающего момента  $M(t)$  (рис. 3, б) на валу ОВГУ по схеме МДП, а также амплитуды напряжения ДГПЧВ (рис. 3, в). Мощность ДГПЧВ – 600 кВт, мощность ОВГУ – 160 кВт.

Имитационный эксперимент состоит из следующих этапов: разгона ОВГУ, резкого сброса нагрузки на 15-й секунде (оголение винта), наброса нагрузки на 18-й секунде (вход винта в воду), последующего дополнительного наброса нагрузки на винт на 21-й секунде и снятия дополнительной нагрузки на 24-й секунде.

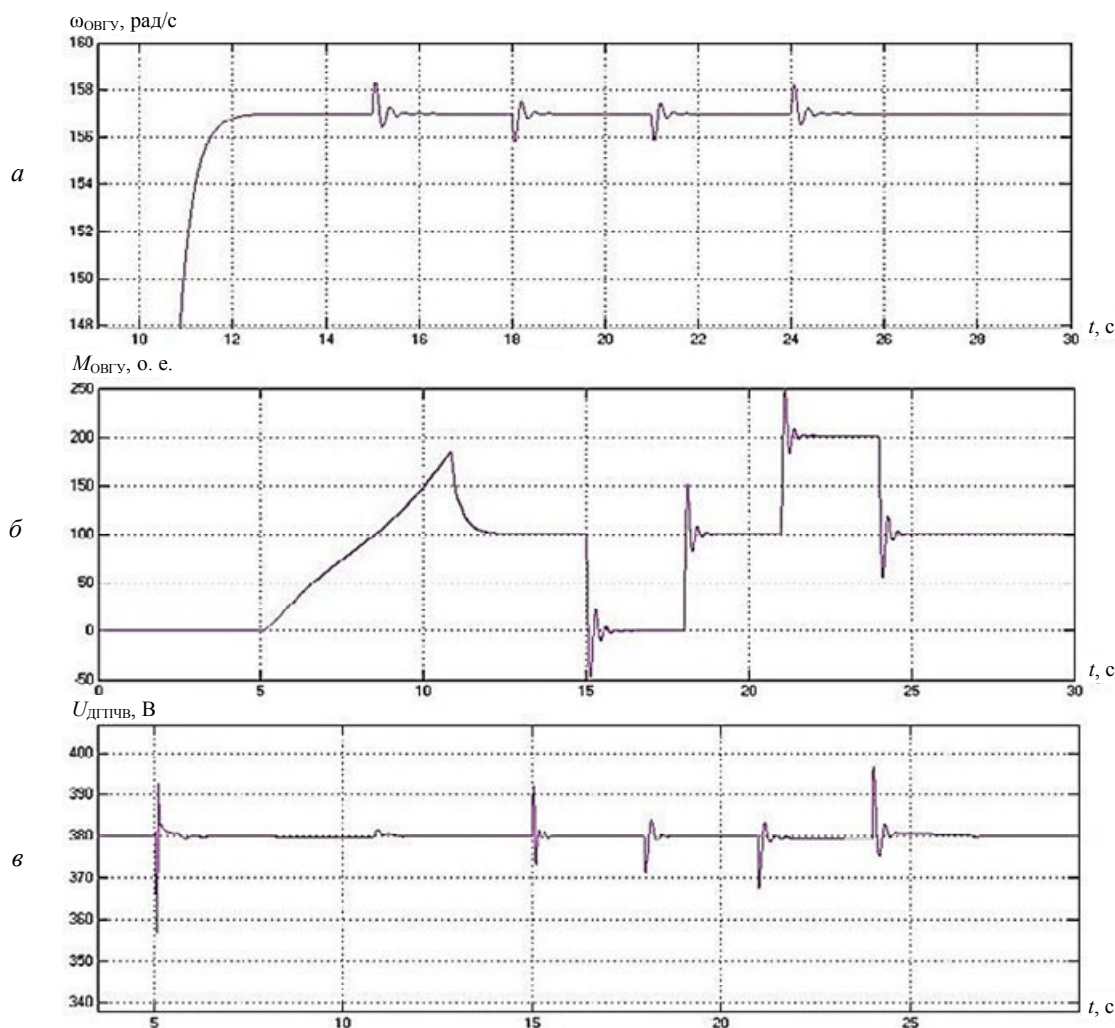


Рис. 3. Переходные процессы в судовой электроэнергетической системе с ОВГУ на основе МДП и ДГПЧВ:  
*а* –  $\omega_{\text{ОВГУ}}$ ; *б* –  $M_{\text{ОВГУ}}$ ; *в* –  $U_{\text{ДГПЧВ}}$

Результаты моделирования подтвердили обеспечение системой регулирования требуемых показателей качества как по статическим, так и по динамическим показателям. С учетом стабилизации частоты вращения ОВГУ и напряжения ДГПЧВ кратковременные отклонения вышеуказанных параметров находятся в допустимых (согласно Российскому морскому регистру судоходства) пределах: от 2 до 2,5 и от 3 до 5 % соответственно.

### Заключение

Предложена концепция построения судовой электроэнергетической системы на основе ДГПЧВ и пропульсивной установки с ОВГУ по схеме МДП, обеспечивающая высокие энергетические показатели работы (минимизация по расходу углеводородного топлива). Разработана математическая модель и проведено имитационное моделирование динамических режимов работы данной системы, которое подтвердило обеспечение требуемых показателей качества регулирования в статических и динамических режимах. Отметим, что предлагаемый вариант системы снижает также нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения объема отработанного масла для утилизации и отличается пониженным уровнем шума, т. к. главные судовые двигатели отключены.

Важным моментом является обеспечение безопасности судоходства. В экстренном случае, при выходе из строя главной энергетической установки, ОВГУ позволит судну сохранить управляемость и продолжить движение.

В заключение отметим, что предложенная концепция структуры судовой электроэнергетической системы применима как для новых судов, так и для модернизации существующих. Кроме того, этот вариант может использоваться для различных типов судов, где важен комфорт и не требуется предельная скорость: прогулочные катера, суда для перевозки грузов и пассажиров, для речного туризма, аренды, рыбалки, спасательные катера. Предложенное решение будет приобретать особенное значение в случаях передвижения в охраняемых зонах или соблюдения строгих требований в области охраны природы и окружающей среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хватов О. С., Бурда Е. М., Тарпанов И. А., Дарьенков А. Б., Кобяков Д. С.* Параллельная работа дизель-генераторных установок постоянной и переменной частоты вращения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 93–99.
2. *Khvatov O. S., Kobayakov D. S.* Increasing the efficiency of a diesel-generator power plant // Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91. Iss. 12. P. 742–748.
3. *Хватов О. С., Кобяков Д. С.* Повышение эффективности дизель-генераторной электростанции // Электротехника. 2020. № 12. С. 25–31.
4. *Delgado C., Dominguez-Navarro J. A.* Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // Ninth international conference on publication year (EVER) (Monaco, March 25–27, 2014). Monaco Sustainable Development Association (MC2D), 2014. P. 1–8.
5. *Онищенко Г. Б., Локтева И. Л.* Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 265 с.
6. *Хватов О. С.* Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: моногр. Н. Новгород: Изд-во ВГУВТ, 2015. 276 с.
7. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 644 с.
8. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
9. *Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С., Поляков И. С.* Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: моногр. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. 172 с.
10. *Трещев Н. И.* Методы исследования электромагнитных процессов в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 287 с.

Статья поступила в редакцию 12.04.2021

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Олег Станиславович Хватов** – д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Россия, 603950, Нижний Новгород; khvatov\_oleg@mail.ru.

**Илья Александрович Тарпанов** – канд. техн. наук; доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Россия, 603950, Нижний Новгород; Fillin2003@mail.ru.

**Павел Вадимович Кузнецов** – студент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Россия, 603950, Нижний Новгород; redourblue@yandex.ru.



## SHIP POWER PLANT WITH REVERSIBLE SHAFT GENERATOR UNIT OPERATING BY DUAL-POWER MACHINE SCHEME AND VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR

*O. S. Khvatov, I. A. Tarpanov, P. V. Kuznetsov*

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the analysis of the operating modes of small displacement vessels, which states that most of the working time the vessels are in standby mode, or move at low speed. The main ship diesel engines operate at a load of 10-15% (maximum 20%), which impacts the operational performance: the oil and water jacket of the engine do not have time to warm up, fuel and oil consumption increases. There takes place coking of piston rings, intercoolers and other components, which leads to a sharp decrease in the service life of the engine. In order to eliminate the disadvantages happening in the main engines operation in shared load modes, it is considered to use the shaft generator unit as a propeller shaft unit in the prolonged operation of the vessel at passing with a low speed and maneuvering. Such a variant of the shaft generator can be called a reversible shaft generator unit (RSGU) capable of operating in both generator and motor modes. At the same time, it is advisable to power the reversible shaft generator and general ship consumers from a diesel generator, which, in order to save fuel, can be applied as a variable speed diesel generator unit. There is presented a RSGU variant based on an asynchronous machine with a phase rotor and a frequency converter in the rotor (a double power supply machine). The functional and structural schemes of the ship's electric power system using the variable speed diesel generator and the propulsive system based on the reversible shaft generator are presented. In the Matlab software there are developed the simulation models and presented the results of simulation modeling of the operating modes of the above systems.

**Key words:** reversible shaft generator unit, variable-speed diesel generator, dual-power machine, ship power plant, frequency converter.

**For citation:** Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznetsov P. V. Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2021;3:93-100. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100.

### REFERENCES

1. Khvatov O. S., Burda E. M., Tarpanov I. A., Dar'enkov A. B., Kobiakov D. S. Parallel'naiia rabota dizel'-generatornykh ustanovok postoianno i peremennoi chastoty vrashcheniia [Parallel operation of constant and variable speed diesel generators]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2018, no. 1, pp. 93-99.
2. Khvatov O. S., Kobyakov D. S. Increasing the efficiency of a diesel-generator power plant. *Russian Electrical Engineering*, 2020, vol. 91, iss. 12, pp. 742-748.
3. Khvatov O. S., Kobiakov D. S. Povyshenie effektivnosti dizel'-generatornoi elektrostantsii [Improving efficiency of diesel generator power plant]. *Elektrotekhnika*, 2020, no. 12, pp. 25-31.
4. Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. *Ninth international conference on publication year (EVER) (Monaco, March 25–27, 2014)*. Monaco Sustainable Development Association (MC2D), 2014. Pp. 1-8.
5. Onishchenko G. B., Lokteva I. L. *Asinkhronnye ventil'nye kaskady i dvigateli dvoynogo pitaniia* [Asynchronous valve stages and dual power motors]. Moscow, Energiia Publ., 1979. 265 p.
6. Khvatov O. S. *Elektrotekhnicheskie generatornye kompleksy peremennoi chastoty vrashcheniia na osnove mashiny dvoynogo pitaniia: monografiia* [Electrotechnical generator complexes of variable frequency of rotation using double power supply machine: monograph]. Nizhni Novgorod, Izd-vo VGUVT, 2015. 276 p.
7. Zinov'ev G. S. *Osnovy silovoi elektroniki: uchebnoe posobie* [Principles of power electronics: tutorial]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2003. 644 p.
8. Shreiner R. T., Efimov A. A. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemnykh elektroprivodakh* [Active converters in controlled electric drives]. Novoural'sk, Izd-vo NGTI, 2001. 250 p.
9. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B., Samoiaev I. S., Poliakov I. S. *Avtonomnye generatornye ustanovki na osnove dvigatelei vnutrennego sgoraniia peremennoi chastoty vrashcheniia: monografiia* [Autonomous gen-

erator installations based on internal combustion engines of variable speed: monograph]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo NGTU im. R. E. Alekseeva, 2016. 172 p.

10. Treshchev N. I. *Metody issledovaniia elektromagnitnykh protsessov v mashinakh peremennogo toka* [Methods of research of electromagnetic processes in AC machines]. Leningrad, Energiia Publ., 1974. 287 p.

The article submitted to the editors 12.04.2021

### ***INFORMATION ABOUT THE AUTHORS***

***Oleg S. Khvatov*** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Electric Engineering and Electric Machinery of Water Transport; Volga State University of Water Transport; Russia, 603950, Nizhny Novgorod; khvatov\_oleg@mail.ru.

***Ilya A. Tarpanov*** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electric Engineering and Electric Machinery of Water Transport; Volga State University of Water Transport; Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Fillin2003@mail.ru.

***Pavel V. Kuznetsov*** – Student of the Department of Electric Engineering and Electric Machinery of Water Transport; Volga State University of Water Transport; Russia, 603950, Nizhny Novgorod; redourblue@yandex.ru.

