

УДК 621.311.236

EDN LWENQA

АВТОНОМНАЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВЕНТИЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

О.С. ХватовORCID: **0009-0007-0345-7523** e-mail: **khvatov_oleg@mail.ru**Волжский государственный университет водного транспорта
*Нижний Новгород, Россия***И.А. Тарпанов**ORCID: **0009-0007-8411-8709** e-mail: **fillin2003@mail.ru**Волжский государственный университет водного транспорта
*Нижний Новгород, Россия***Т.З. Билялетдинов**ORCID: **0009-0009-6526-1598** e-mail: **tim.bil.99@mail.ru**Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Перспективным направлением современной энергетики является разработка дизельных электростанций, обладающих повышенными энергетическими показателями, которые обеспечиваются за счет регулирования частоты вращения приводного дизельного двигателя на режимах долевой нагрузки. В результате суммарный расход топлива электростанцией существенно снижается, поскольку удельные показатели расхода топлива поддерживаются практически близкими к номинальным значениям. Известные преимущества асинхронной машины ранее не смогли обеспечить ей широкое применение в составе генераторных комплексов. Данное обстоятельство связано как с необходимостью наличия источника реактивной мощности для возбуждения асинхронной машины, так и с требованием по плавному регулированию реактивной мощности. С внедрением силовых транзисторных преобразовательных устройств, в частности, активных выпрямителей напряжения, возможности по использованию асинхронных машин в составе генераторных комплексов существенно расширились. В статье представлена концепция системы автоматического регулирования напряжения дизель-генераторной установки, работающей с переменной скоростью вращения. Система регулирования напряжения построена на базе преобразователя частоты, используемого в качестве регулируемого источника реактивной мощности. Преобразователь частоты содержит выпрямительный блок, построенный на полностью управляемых полупроводниковых ключах. Возбуждение генератора обеспечивается емкостью в звене постоянного тока полупроводникового

преобразователя. Функция регулирования реактивной мощности, подаваемой в обмотку статора асинхронной машины, выполняется активным выпрямителем напряжения. Автоматическое регулирование напряжения в статоре реализовано по принципу векторного управления. Система регулирования, на основе сигналов датчиков скорости вращения ротора и величины напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты, формирует сигнал управления активным выпрямителем напряжения, который обеспечивает необходимое для стабилизации напряжения значение реактивной мощности в статоре асинхронной машины. Представлена функциональная схема асинхронной дизель-генераторной электростанции, а также ее имитационная математическая модель.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, асинхронная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения, асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, векторное управление.

Для цитирования: Хватов О.С., Тарпанов И.А., Билялетдинов Т.З. Автономная дизель-генераторная электростанция на основе асинхронного генератора с вентильным возбуждением и системой автоматического регулирования напряжения с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 19-31. EDN LWENQA

STAND ALONE DIESEL GENERATOR POWER PLANT BASED ON ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH VALVE EXCITATION AND AUTOMATIC VOLTAGE CONTROL SYSTEM WITH VECTOR CONTROL

O.S. Khvatov

ORCID: **0009-0007-0345-7523** e-mail: **khvatov_oleg@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

I.A. Tarpanov

ORCID: **0009-0007-8411-8709** e-mail: **fillin2003@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

T.Z. Bilyaletdinov

ORCID: **0009-0009-6526-1598** e-mail: **tim.bil.99@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A promising direction of modern electric power engineering is the development of diesel generator sets of variable speed, which change the rotation speed of

the diesel engine in accordance with the optimal performance. As a result, the total fuel consumption of the power plant is significantly reduced, since the specific fuel consumption remains practically close to the nominal values. An asynchronous machine has a number of advantages over a synchronous one, namely, lower weight, dimensions and cost, and higher reliability. Nevertheless, asynchronous generators have not yet been widely used. The main obstacle remained the technical problem of both the excitation of the asynchronous machine, which is impossible without additional sources of reactive power, and the requirement for smooth regulation of reactive power. With the introduction of power transistor converters, in particular, active voltage rectifiers, the possibilities for using asynchronous machines as part of generator complexes have significantly expanded. The paper presents the concept of an automatic voltage regulation system for a diesel generator set operating at a variable rotational speed. The voltage regulation system is based on a frequency converter used as a source of reactive power needed to create an asynchronous generator flow. The frequency converter in the presented system contains a rectifier unit built on fully controlled semiconductor switches. The excitation of the generator is provided by reactive power, created by a controlled rectifier and a capacitance in the DC link of a semiconductor converter. An active voltage rectifier performs the function of regulating the reactive power supplied to the stator winding of an asynchronous machine. Automatic voltage regulation in the stator is implemented using the vector control. The control system, based on the signals of the rotor rotation speed sensors and the voltage in the DC link, generates a signal for the active voltage rectifier, which, in turn, smoothly adjusts the voltage at the generator output by adjusting the reactive power of the machine. The functional and structural diagrams of the mathematical model of the system are presented.

Keywords: asynchronous generator, diesel generator set of variable speed, frequency converter, vector control.

For citation: O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and T.Z. Bilyaletdinov, “Stand alone diesel generator power plant based on asynchronous generator with valve excitation and automatic voltage control system with vector control”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 19-31, 2024. EDN LWENQA

I. Введение

В настоящее время вопросы повышения энергоэффективности технологических процессов производства, в том числе, процессов генерирования электроэнергии, являются основополагающими для дальнейшего развития техники [1]. Рациональное использование энергоресурсов путем применения передовых энергосберегающих технологий является приоритетной задачей развития всех отраслей, в частности, водного транспорта [2]. Один из способов повышения эффективности производства электроэнергии на судах основан на использовании в составе судовой электроэнергетической системы электростанций на основе генераторных агрегатов переменной частоты вращения. Большинство дизельных электростанций, которые принято классифицировать как электростанции классического типа, работают

на постоянной частоте вращения при любом уровне нагрузки в сети. Поддержание постоянства оборотов объясняется тем, что скорость вращения приводного двигателя, определяет частоту генерируемого напряжения. Таким образом, независимо от величины нагрузки в сети, обороты приводного дизельного двигателя поддерживаются неизменными [3].

Авторами предложена система регулирования асинхронной дизельной электростанции переменной частоты вращения (АДГЭПЧВ), обеспечивающая стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии. Автономный инвертор стабилизирует частоту генерируемого напряжения [4].

II. Принцип работы электростанции

Автономные асинхронные генераторы нуждаются в источнике реактивной мощности, необходимой для создания магнитного потока машины [5]. При этом, если асинхронный генератор работает с переменными нагрузкой и частотой вращения, необходимо применять меры для стабилизации величины генерируемого напряжения [6]. Существуют различные способы решения данной проблемы: например, применение повышающего трансформатора, подключенного к обмотке статора машины и стабилизирующего широтно-импульсного преобразователя в звене постоянного тока преобразователя. Другим способом стабилизации генерируемого напряжения автономного асинхронного генератора является использование вентильного преобразователя, подключенного к статору машины и используемого в качестве источника регулируемой реактивной мощности [7].

Существуют различные подходы к регулированию напряжения в автономных АДГЭПЧВ. Одним из них является использование систем автоматического регулирования с векторным управлением.

Функциональная схема АДГЭПЧВ представлена на рис. 1. В схеме приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; АГ – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; ДС – датчик частоты вращения ротора генератора, необходимый для вычисления оптимальной величины потока ротора и угла поворота вращающейся системы координат, в которой записаны уравнения асинхронного короткозамкнутого генератора; ЗП – задатчик величины потока – выполняет функцию задания или расчета оптимальной величины потока в зависимости от частоты вращения ротора; ВП – вычислитель потока – выполняет функцию косвенного определения величины потока ротора; РП – регулятор потока ротора, выходной сигнал которого является сигналом задания для тока статора по оси x (i_{sx}); ДН – датчик величины напряжения в звене постоянного тока; РН – регулятор напряжения, выходной сигнал которого является сигналом задания для тока статора по оси y (i_{sy}); ПК1, ПК2 – преобразователи координат – осуществляют перевод значений токов статора из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную, вращающуюся систему координат

нат (x, y) и наоборот; ШИМ контроллер сравнивает значения задания величины трехфазного тока со значениями с датчиков тока и формирует сигналы управления полупроводниковыми ключами активного выпрямителя; АВ – активный выпрямитель; И – инвертор.

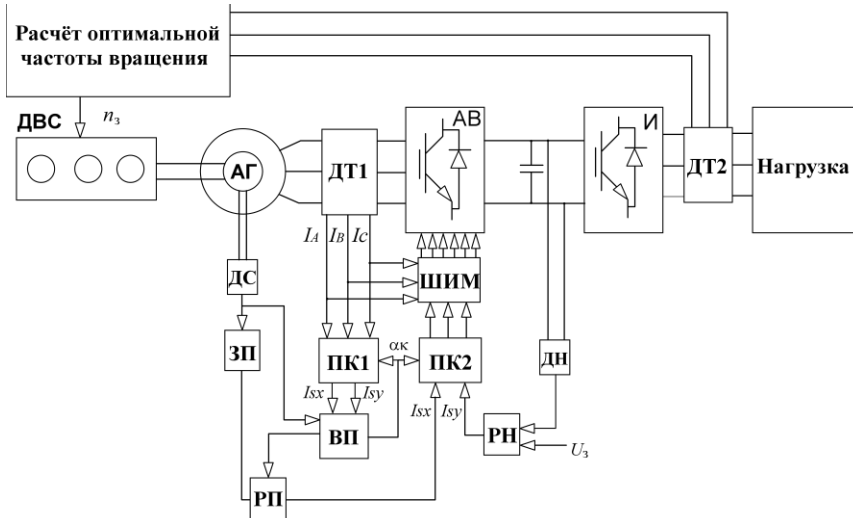


Рис. 1. Функциональная схема АДГЭПЧВ

Fig. 1 Functional diagram of the asynchronous variable speed diesel power plant

Авторами статьи представлена математическая модель АДГЭПЧВ на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором с вентильным возбуждением и векторной системой автоматического регулирования напряжения.

III. Математическая модель асинхронного генератора

Математическое описание асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, выполненное на основе теории обобщенной двухфазной электрической машины в системе синхронно вращающихся координат (x, y), представим для случая, когда в качестве опорного вектора выбрано потокоцепление ротора [8].

Ориентируем ось x по вектору потокоцепления ротора, что позволяет принять: $\psi_{RY} = 0$; $\psi_R = \psi_{RX}$; $\omega_K = \omega_1$.

Уравнения равновесия напряжений статора и ротора в данном случае можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_{SX} &= R_S i_{SX} + \frac{d\psi_{SX}}{dt} - \omega_1 \psi_{SY}; \\
 u_{SY} &= R_S i_{SY} + \frac{d\psi_{SY}}{dt} + \omega_1 \psi_{SX}; \\
 0 &= R_R i_{RX} + \frac{d\psi_{RX}}{dt}; \\
 0 &= R_R i_{RX} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX}; \\
 \psi_{SX} &= L_S i_{SX} + L_m i_{RX}; \\
 \psi_{SY} &= L_S i_{SY} + L_m i_{RY}; \\
 \psi_{RX} &= L_m i_{SX} + L_R i_{RX}; \\
 0 &= L_m i_{SY} + L_R i_{RY}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u_{SX} , u_{SY} , i_{SX} , i_{SY} , ψ_{SX} , ψ_{SY} – проекции обобщенных векторов напряжения, тока и потокосцепления статора по осям x и y ; ψ_{RX} – проекция обобщенного вектора потокосцепления ротора по оси x ; i_{RX} , i_{RY} – проекции обобщенных векторов тока ротора по осям x и y ; ω_1 – угловая скорость вращения поля статора; ω_2 – угловая скорость вращения ротора; L_S , L_R – индуктивности фазных обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность; R_S , R_R – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора.

При $\psi_R = \text{const}$ третье уравнение в системе (1) упрощается, поскольку второе слагаемое справа от знака равенства равно нулю. Следовательно, уравнения ротора примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R_R i_{RX} &= 0; \\
 R_R i_{RY} &= (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX};
 \end{aligned} \tag{2}$$

С учетом первого уравнения системы (2), седьмое уравнение системы (1) определяет потокосцепление ротора в виде:

$$\psi_{RX} = L_m i_{SX}. \tag{3}$$

Потокосцепление ротора определяется проекцией тока статора на ось x . При этом скорость вращения системы координат может быть рассчитана в соответствии со следующим выражением:

$$\omega_1 = \frac{R_R i_{RY}}{\psi_{RX}} + \omega_2; \tag{4}$$

Преобразуем (4), исключив из него i_R :

$$\omega_1 = \frac{K_R R_R i_{SY}}{\Psi_{RX}} + \omega_2, \quad (5)$$

где $K_R = L_m / L_R$ – безразмерный коэффициент.

Для реализации векторного регулирования напряжения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором ориентируем систему координат (x, y) таким образом, чтобы вектор потокосцепления ротора совпал с осью x . В этом случае проекция тока статора по оси x определяет значение потокосцепления ротора согласно (3), а проекция тока статора по оси y величину напряжения в статоре асинхронного короткозамкнутого генератора.

Математическая модель нагрузки

Уравнение активно-индуктивной нагрузки имеет вид [9]:

$$U_H = R_H I_H + L_H \frac{dI_H}{dt}, \quad (6)$$

где U_H – напряжение на нагрузке; I_H – ток нагрузки; R_H, L_H – активное сопротивление нагрузки; L_H – индуктивность нагрузки.

Во вращающейся с угловой скоростью ω_1 системе координат, при условии, что ось x совпадает с вектором Ψ_R , (6) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{HX} &= R_H i_{HX} + \frac{X_H}{\omega_1} \frac{di_{HX}}{dt} - X_H i_{HY}; \\ U_{HY} &= R_H i_{HY} + \frac{X_H}{\omega_1} \frac{di_{HY}}{dt} + X_H i_{HX}, \end{aligned} \quad (7)$$

где U_{HX} и U_{HY} – проекции вектора напряжения нагрузки по оси x и y ; i_{HX} и i_{HY} – проекции вектора тока нагрузки по оси x и y ; X_H – реактивное сопротивление нагрузки;

Преобразуем (7), чтобы получить выражения для составляющих тока нагрузки. Из первого уравнения системы (7) выражаем ток по оси x :

$$i_{HX} = \frac{U_{HX} + X_H i_{HY}}{R_H + \left(\frac{X_H}{\omega_1}\right) p}. \quad (8)$$

Из второго уравнения системы (7) выражаем ток по оси y :

$$i_{HY} = \frac{U_{HY} - X_H i_{HX}}{R_H + \left(\frac{X_H}{\omega_1}\right) p}. \quad (9)$$

Математическое модель двигателя внутреннего сгорания

Инерционность дизельного двигателя как объекта управления обусловлена инерцией вращающихся масс его конструкции. При этом дизельный двигатель как объект управления будет иметь два канала воздействия на скорость:

- канал нагрузочного воздействия;
- канал регуляторного воздействия.

Таким образом, общее уравнение динамики дизельного двигателя без турбонаддува может быть представлено в следующем виде [10]:

$$Tpy_0 = x_0 - \mu, \quad (10)$$

где T – время разгона, y_0 – относительная величина частоты вращения дизельного двигателя, x_0 – относительная величина перемещения топливodoзирующего органа; μ – относительная величина нагрузки на дизельный двигатель.

На основе уравнений асинхронной машины, дизельного двигателя и блока активно-индуктивной нагрузки разработана структурная схема математической модели автономного асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и векторным регулированием напряжения (рис. 2).

Система регулирования АДГЭПЧВ

Вычислитель оптимальных (энергоэффективных) оборотов вала ДВС на основании значений активных фазных токов в нагрузке формирует задающий сигнал для регулятора скорости ДВС [11]. Скорость ДВС меняется в заданном диапазоне в зависимости от величины нагрузки. Система управления генератором состоит из двух каналов: по потокосцеплению ротора, а также по величине напряжения в звене постоянного тока. Выходной сигнал регулятора потокосцепления ротора является задающим для регулирования составляющей тока i_{sx} . Регулирование составляющей тока i_{sx} позволяет обеспечивать векторное управление напряжением генератора при постоянном потокосцеплении ротора. На выходе регулятора напряжения формируется задающий сигнал регулирования составляющей статора i_{sy} .

В структурной схеме (рис. 2) также представлен преобразователь частоты в виде инерционных звеньев в каналах по осям x и y . Стабилизация частоты выходного напряжения обеспечивается инвертором напряжения в составе преобразователя.

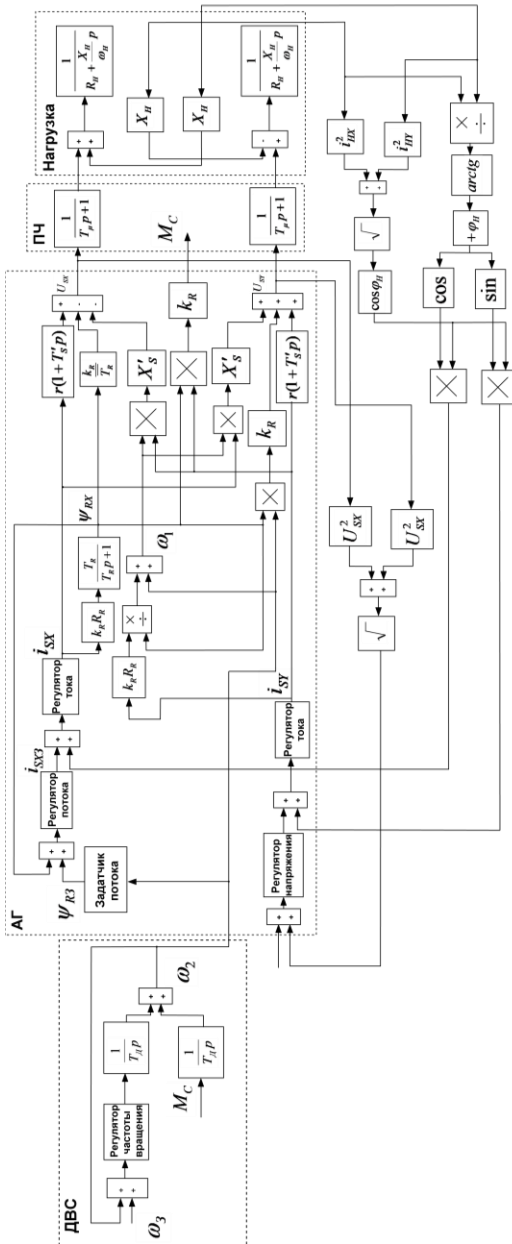


Рис. 2. Структурная схема АДГЭПВЧ
 Fig. 2. Block diagram of the asynchronous variable speed diesel power plant

На рис. 2 представлена структурная схема АДГЭПЧВ, построенная в соответствии с вышеприведенными математическими моделями составляющих электростанции и алгоритмом работы системы регулирования. По данной структурной схеме создана имитационная модель динамических режимов работы АДГЭПЧВ в пакете программ *Matlab*.

Результаты моделирования изменения амплитуды напряжения $U_1(t)$ при изменении частоты вращения вала установки на 20 % ($t = 1$ с), а также при подключении нагрузки равной номинальной ($t = 1,5$ с) приведены на рис. 3. Параметры асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором: $S = 200$ кВА, $\eta = 0,94$, $U = 380$ В, $I_{1H} = 284$ А, $n_n = 1500$ об/мин.

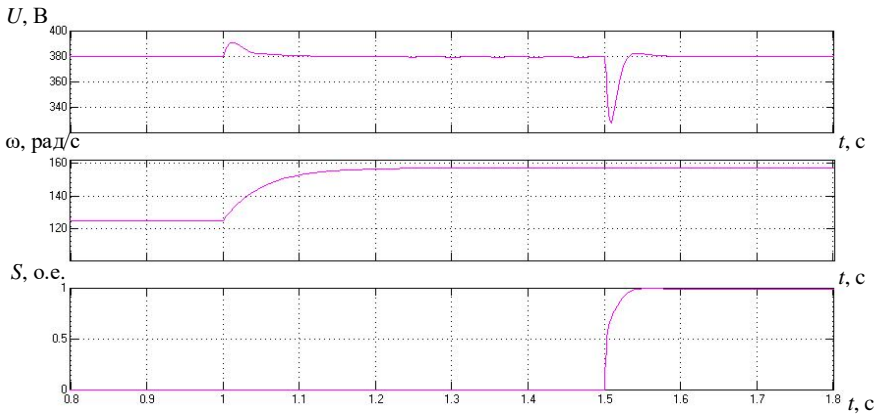


Рис. 3. Временные зависимости изменения амплитуды напряжения $U_1(t)$ при изменении скорости вращения и подключении нагрузки

Fig. 3. Time dependences of the change in the voltage amplitude $U_1(t)$ during changing rotation speed and connecting load

IV. Заключение

Результаты моделирования (рис. 3) подтверждают обеспечение АДГЭПЧВ требуемых показателей качества регулирования как в установившемся режиме (статическая ошибка), так и в динамике (время переходного процесса). Например, подключение 100 % активной нагрузки сопровождается провалами амплитуды напряжения ΔU_1 в среднем не более 15 % от номинального значения.

© Хватов О.С., 2024

© Гарпанов И.А., 2024

© Билялетдинов Т.З., 2024

Поступила в редакцию 09.06.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Received 09.06.2024

Accepted 16.07.2024

Библиографический список

- [1] Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р., Малышев С.М. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота Имени Адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12. № 4. С. 801-811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4- 801-811
- [2] Григорьев А.В., Малышев С.М., Зайнуллин Р.Р. Опыт проектирования и испытаний первого отечественного судового вентильного дизель-генератора // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота Имени Адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 766-775. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] Виноградов А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности // XI Межд. (XXII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2020, Октябрь 04-07, 2020, Санкт-Петербург, Россия: ИТМО, 2020. С. 80-86.
- [4] Виноградов А.Б. Горелкин Р.О. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета. 2023. № 3. С. 43-51. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] Taoufik M., Lassad S. Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2017. № 4 (3). С. 377-386. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] Radha Krishna Reddy S., Subrahmanyam J.B.V., Srinivasula Reddy A. Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller // Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT). 2023. № 9 (3). С. 71-81. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Sun Y., Hu J., Li C. Research on power generation control of asynchronous machine as main generator // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2020. № 21 (2). 20190059. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] Khamis A.A.H., Ahmed-Zaid S. Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications // 2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC), Oct. 29-31, 2021, Hammamet, Tunisia: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] Хватов О.С., Кобяков Д.С. Асинхронные дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3 (19). С. 19-31. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19
- [10] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Поляков И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения. Н. Новгород: НГТУ, 2016. – 172 с.
- [11] Дарьенков А.Б. Повышение эффективности автономных генераторных установок на основе ДВС переменной частоты вращения: автореф. дисс. доктора техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2020. – 343 с.

References

- [1] A.V. Grigoriev, R.R. Zainullin and S.M. Malyshev, “Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 12, no. 4, pp. 801-811, 2020. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4- 801-811
- [2] A.V. Grigoriev, S.M. Malyshev and R.R. Zainullin, “Experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator”, *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol. 11, no. 4, pp. 766-775, 2019. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] A.B. Vinogradov, “Avtonomnaya stanciya elektrosnabzheniya na osnove asinhronnogo generatora s KZ rotorom i preobrazovatelya chastoty ponizhennoj moshchnosti [Autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a squirrel-cage rotor and a low-power frequency converter]”, in proc. *XI International (XXII All-Russian) conference “Avtomatizirovannyi elektroprivod AEP 2020 [Automated Electric Drive AED 2020]”*, Oct. 04-07, 2020, St. Petersburg, Russia, pp. 80-86 (in Russian).
- [4] A.B. Vinogradov and R.O. Gorelkin, “Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter”, *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 3, pp. 43-51, 2023. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] M. Taufiq and S. Lassad, “Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 377-386, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] S. Radha Krishna Reddy, J.B.V. Subrahmanyam and A. Srinivasula Reddy, “Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller”, *Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT)*, vol. 9, no. 3, pp. 71-81, 2023. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Y. Sun, J. Hu and C. Li, “Research on power generation control of asynchronous machine as main generator”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 21, no. 2, 20190059, Mar. 2020. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] A.A.H. Khamis and S. Ahmed-Zaid, “Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications”, in proc. *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Oct. 29-31, 2021, Hammamet, Tunisia. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] O.S. Khvatov and D.S. Kobayakov, “Asynchronous diesel generator sets with variable speed”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 19, pp. 19-31, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19
- [10] O.S. Khvatov, A.B. Darienkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Avtonomnye generatorye ustanovki na osnove dvigatelej vnutrennego sgoraniya peremennoj chastoty vrashcheniya [Autonomous generator sets based on variable-speed internal combustion engines]*. N. Novgorod: NNSTU, 2016 (in Russian).

- [11] A.B. Dar'enkov, "Povyshenie effektivnosti avtonomnyh generatornyh ustanovok na osnove DVS peremennoj chastoty vrashcheniya [Improving the efficiency of autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines]", D. of Tech. S. thesis, NNSTU, N. Novgorod, Russia, 2020 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хватов Олег Станиславович, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg S. Khvatov, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Тарпанов Илья Александрович, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Иуа А. Tarpanov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Билялетдинов Тимур Закарияевич, аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Timur Z. Zakariyaevich, postgraduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.