

УДК 621.311.61

DOI 10.46960/2658-6754_2022_3_19

АСИНХРОННЫЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

О.С. Хватов

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Д.С. Кобяков

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: epa-guitar@mail.ru

В условиях роста цен на углеводородное топливо, а также в связи с ужесточением требований по экологической безопасности процесса производства электроэнергии, повышение энергоэффективности дизель-генераторных установок (ДГУ) становится особо актуальным. Один из способов повышения энергоэффективности ДГУ связан с исследованием и разработкой ДГУ переменной частоты вращения (ДГПЧВ), которые обеспечивают оптимизацию потребления углеводородного топлива за счет принудительного регулирования частоты вращения дизеля на режимах долевой нагрузки электростанции. ДГПЧВ – это машинно-вентильные генераторные комплексы, где, как правило, в качестве генератора используется синхронная машина. Авторы предлагают к рассмотрению вариант ДГПЧВ с асинхронной короткозамкнутой машиной в качестве генератора и активным выпрямителем напряжения (АВН). Проведено имитационное моделирование динамических процессов коммутации нагрузки и регулирования частоты вращения двигателя внутреннего сгорания с учетом поддержания энергоэффективного режима работы ДГПЧВ.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения (АВН), асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГКЗ), дизель-генераторные установки переменной частоты вращения (ДГПЧВ).

Для цитирования: Хватов О.С., Кобяков Д.С. Асинхронные дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 3. С. 19-31. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19

ASYNCHRONOUS DIESEL GENERATOR SETS WITH VARIABLE SPEED

O.S. Khvatov

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

D.S. Kobyakov

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: epa-guitar@mail.ru

Abstract. In the context of rising prices for hydrocarbon fuels, as well as in connection with the tightening of requirements for the environmental safety of the electricity production process, improving the energy efficiency of diesel generator system (DGS) is becoming especially relevant. One of the ways to increase the energy efficiency of diesel generator sets is related to the research and development diesel generator with variable speed (DGVS), which ensure the optimization of hydrocarbon fuel consumption due to forced regulation of the diesel engine speed in the power plant share load modes. DGVS are machine - valve generator complexes, in which, as a rule, a asynchronous machine is used as a generator. The authors propose for consideration a variant of the DGVS with an asynchronous squirrel-cage machine (ASCM) as a generator and an active rectifier (AVR). Simulation modeling of the dynamic processes of load switching and regulation of the internal combustion engine speed was carried out, taking into account the maintenance of an energy-efficient mode of operation of the DGVS.

Keywords: active voltage rectifier (AVN), asynchronous generator with a squirrel-cage rotor (AGKZ), variable speed diesel generator sets (DGCHV).

For citation: O.S. Khvatov and D.S. Kobyakov, "Asynchronous diesel generator sets with variable speed", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 19-31, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_19

I. Введение

Повышение эффективности процесса генерирования электроэнергии является важной технической задачей. Ее решение в области малой энергетики, где существенную часть генерирующих мощностей составляют ДГУ, связано с оптимизацией расхода углеводородного топлива на долевых режимах работы электростанции.

Один из способов оптимизации расхода углеводородного топлива ДГУ основан на изменении работы дизельной электростанции, когда при долевых нагрузочных режимах осуществляется принудительное регулирование частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания.

Энергетическая целесообразность данного способа подтверждена как теоретически (с учетом многопараметровой характеристики двигателя внутреннего сгорания), так и на практике [1, 2].

Исследование и разработка дизель-генераторных электростанций переменной частоты вращения проводятся в зарубежных («Honda», «Купор») и отечественных (НПЦ «Электродвижение судов», г. Санкт-Петербург, ОАО «Сигма», г. Ковров) компаниях, а также в ряде российских вузов: Нижегородский, Саратовский, Томский государственные технические университеты, Волжский государственный университет водного транспорта (г. Нижний Новгород), Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова (г. Санкт-Петербург).

Дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения (ДГПЧВ) – это машинно-вентильные генераторные комплексы, которые обеспечивают стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии (частоты и амплитуды напряжения) средствами полупроводникового преобразователя частоты выпрямительно-инверторного типа. Обычно в качестве электрического генератора в составе классических ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПЧВ используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением либо с постоянными магнитами. Это объясняется возможностью возбуждения синхронного генератора без использования дополнительных устройств (источников реактивной мощности).

Известны преимущества асинхронной короткозамкнутой машины по сравнению с синхронной: меньшая масса и стоимость, более высокая надежность и др. Однако использование асинхронной машины в качестве электрического генератора до последнего времени сдерживалось невозможностью возбуждения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором (АГКЗ) без дополнительных устройств (конденсаторные батареи и др.). Использование АГКЗ в составе генераторных комплексов переменной частоты вращения сопряжено с дополнительными сложностями.

Применение активного выпрямителя напряжения (АВН) [3, 4], способного обеспечить возбуждение асинхронной машины, существенно расширяет возможности по использованию АГКЗ в составе генераторных комплексов переменной частоты вращения. В качестве примера асинхронно-вентильных генераторных комплексов переменной частоты вращения с АВН могут быть приведены ветроэлектрические установки (ВЭУ) и малые гидроэлектростанции (МГЭС) [5, 6], работы по исследованию и разработке которых активно ведутся за рубежом и в нашей стране.

На автономных транспортных объектах, например, на судах морского и речного флота, вопросы рациональной энергетики особо актуальны, т.к. непосредственно связаны с экономией ограниченного запаса углеводородного топлива в танках судна. Применение дизель-генераторных

установок в составе судовой электростанции путем перевода их режима работы на переменную частоту вращения при долевых нагрузках [7-11], использование валогенераторных установок существенно повышают энергетические показатели судовой электростанции.

Таким образом, исследование и разработка асинхронно-вентильных ДГПЧВ является актуальным направлением в малой энергетике.

II. ДГПЧВ на базе АГКЗ и АВН

Авторы статьи предлагают к рассмотрению вариант ДГПЧВ на основе АГКЗ и АВН, структурная схема которой приведена на рис. 1. Система регулирования ДГПЧВ объединяет системы регулирования ДВС, АВН и АИН.

Система регулирования ДВС (рис. 1) состоит из следующих элементов:

- задатчик экономичного режима (ЗЭР) работы ДВС, который рассчитывает величину оптимальной частоты вращения вала ДВС в соответствии с его многопараметровой характеристикой;
- регулятор оборотов (РО) ДВС, который обеспечивает поддержание энергоэффективной частоты вращения вала ДВС;
- топливный регулятор (ТР) (сервопривод), определяющий положение рейки топливного насоса ДВС;
- датчик частоты вращения (ДЧВ) ДВС, измеряющий частоту вращения коленчатого вала ДВС;
- датчик расхода топлива (ДРТ) ДВС, измеряющий мгновенный расход топлива ДВС;
- датчик напряжения (ДН) статора АГКЗ;
- датчик тока (ДТ) статора АГКЗ.

Система регулирования АВН построена по принципу подчиненного регулирования и состоит из внутреннего контура тока и внешнего контура напряжения. Внутренний контур тока формирует динамику токов и ограничивает максимальное значение тока АГКЗ. Внешний контур напряжения стабилизирует уровень выходного напряжения АВН.

Система управления АИН состоит из одного контура напряжения и выполняет функцию стабилизации выходного напряжения ДГПЧВ.

Управление силовыми транзисторами АВН и АИН осуществляется по методу векторной ШИМ. Блок ГОН (генератор опорного напряжения ШИМ) формирует опорное напряжение для блока векторной ШИМ, входящего в состав системы управления АИН.

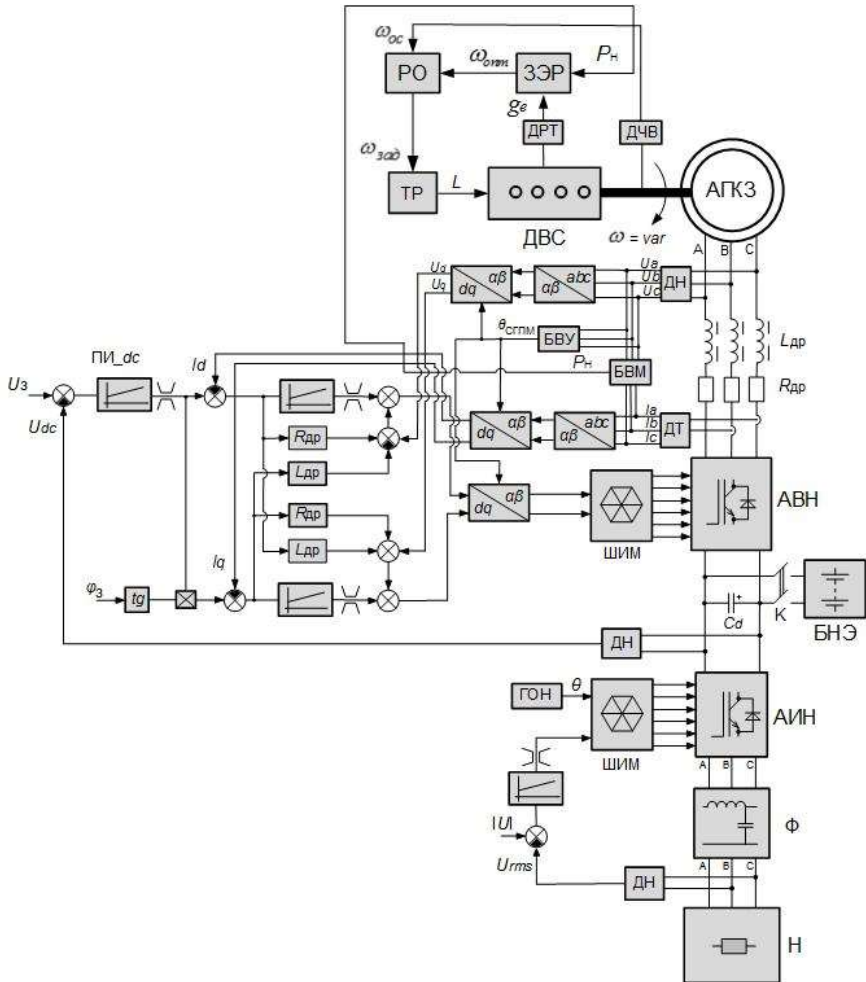


Рис. 1. Структурная схема ДГПЧВ на основе АГКЗ и АВН:
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания; БНЭ – буферный накопитель
 электроэнергии; АИН – автономный инвертор напряжения;
 Ф – LC фильтр; Н – нагрузка

Fig. 1. Structural diagram of DGVS based on AGSCR and AVR:
 ICE – internal combustion engine; BNE – buffer storage of electric energy;
 AIN – autonomous voltage inverter; F – LC filter; N – load

Математическая модель ДППЧВ на основе АГКЗ с АВН представлена системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 T \frac{dy_0}{dt} &= x_0 - \mu; \\
 U_1 &= r(1 + T'_S) i_{Sx} - \omega_1 L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Rx} - k_R p \omega_m \Psi_{Ry}; \\
 0 &= r(1 + T'_S) i_{Sy} + \omega_1 L'_S i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Ry} - k_R p \omega_m \Psi_{Rx}; \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx} - (p \omega_m - \omega_1) \Psi_{Ry}; \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Ry} + s \Psi_{Ry} - (p \omega_m - \omega_1) \Psi_{Rx}; \\
 m &= K_R (\Psi_{Rx} i_{Sy} - \Psi_{Ry} i_{Sx}) + J s \omega_m; \\
 u_d &= R_{\text{дп}} i_d + L_{\text{дп}} \frac{di_d}{dt} - \omega_{0el} L_{\text{дп}} i_q + u_{fd}; \\
 u_q &= R_{\text{дп}} i_q + L_{\text{дп}} \frac{di_q}{dt} - \omega_{0el} L_{\text{дп}} i_d + u_{fd}; \\
 u_{fd} &= f_d u_{dc}; u_{fq} = f_q u_{dc}; \\
 i_{\text{АВН}} &= \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q); \\
 i_{\text{АВН}} - i_{dc} &= C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt}; \\
 u_{dн} &= R_{\text{н}} i_{dн} + X_{\text{н}} \frac{1}{\omega_{\text{н}}} p i_{dн} - X_{\text{н}} i_{qн}; \\
 u_{qн} &= R_{\text{н}} i_{qн} + X_{\text{н}} \frac{1}{\omega_{\text{н}}} p i_{qн} - X_{\text{н}} i_{dн},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где y_0 , x_0 , μ – безразмерные величины изменения скорости вращения вала ДВС, положения рейки топливного насоса, нагрузки ДВС соответственно; T , T'_S , T_R – постоянная времени ДВС и электромагнитные постоянные времени статора и ротора АГКЗ соответственно; i_{Sx} , i_{Sy} – мгновенные значения фазных токов статора АГКЗ в системе координат x - y соответственно; R_R – активное сопротивление ротора АГКЗ; L_S – индуктивности обмоток АГКЗ; Ψ_{Rx} , Ψ_{Ry} – потокосцепления ротора АГКЗ в системе координат x - y ; ω_m , ω_1 – угловая частота вращения ротора и магнитного поля статора; m –

электромагнитный момент АГКЗ; u_d, u_q, i_q, i_d – мгновенные значения фазных напряжений и токов на входе АВН в системе координат $d-q$ соответственно; u_{fd}, u_{fq} – мгновенные значения напряжений на транзисторных стойках АВН в системе координат $d-q$; S_d, S_q, f_d, f_q – состояния ключей транзисторных стоек и функции коммутации ключей АВН в системе координат $d-q$ соответственно; $R_{др}, L_{др}$ – активное сопротивление и индуктивность дросселя на входе АВН соответственно; U_{dc}, U_{dk} – напряжение звена постоянного тока и емкость конденсатора на выходе АВН соответственно; $I_{АВН}, i_{dc}$ – ток на выходе АВН и ток звена постоянного напряжения соответственно; $u_{dн}, u_{qн}, i_{dн}, i_{qн}$ – мгновенные значения фазных напряжений и токов нагрузки в системе координат $d-q$ соответственно; $R_{н}, X_{н}$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки соответственно.

III. Математическое моделирование ДГПЧВ на основе АГКЗ с АВН в пакете *Matlab Simulink*

Имитационная модель ДГПЧВ на основе АГКЗ с АВН, разработанная в пакете *Matlab Simulink*, представлена на рис. 2.

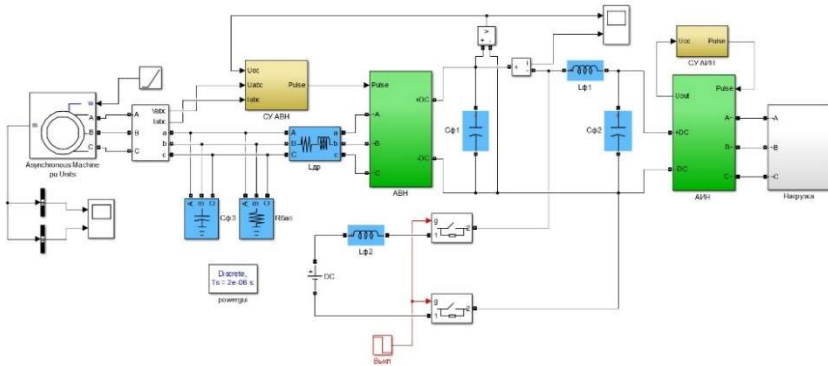


Рис. 2. Имитационная модель АГКЗ с АВН в пакете *Matlab Simulink*

Fig. 2. Simulation model of AGSCR with AVR in the *Matlab Simulink* package

Элементы $R_{бал}, C_{ф3}$ предназначены для улучшения синусоидальности напряжения АГКЗ. Элемент $C_{ф1}$ – конденсатор сглаживающего фильтра на выходе АВН, а элементы $L_{ф1}, C_{ф2}$ образуют LC – фильтр на входе АИН. Цель имитационного эксперимента состоит в подтверждении возможности возбуждения АГКЗ средствами АВН, стабилизации параметров напряжения в нагрузке с учетом ее величины и характера, а также энергоэффективной частоты вращения вала ДВС.

Регулировка частоты вращения ДВС осуществлялась в соответствии с графиком зависимости оптимальной (энергоэффективной) частоты вращения ДВС (рис. 3) от мощности нагрузки, который построен на основе многопараметровой характеристики дизельного двигателя.

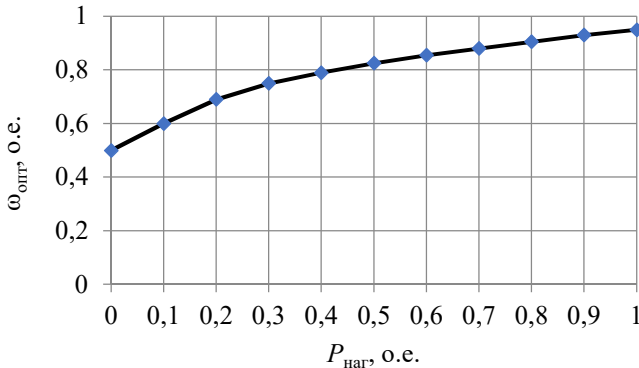


Рис. 3. Зависимость оптимальной частоты вращения ДВС от мощности нагрузки

Fig. 3. Dependence of the optimal engine speed on the load power

Имитационный эксперимент (рис. 4) состоит из 4-х этапов.

1. В начальный момент времени происходит возбуждение АГКЗ ($P_n = 37$ кВт; $n_n = 1480$ об/мин) от АВН и стабилизация напряжения на выходе генератора.
2. На 2-ой секунде подключается активная нагрузка мощностью 15 кВт.
3. На 3,5-й секунде происходит подключение дополнительно активно-реактивной нагрузки. Суммарная мощность нагрузки составляет 35 кВА, $\cos\varphi_n = 0,8$.
4. На 5-й секунде отключается подключенная ранее на 3,5 секунде активно-реактивная нагрузка. Суммарная мощность нагрузки становится равной 15 кВт. Одновременно осуществляется снижение частоты вращения ДВС до 0,8 от номинального значения в соответствии с зависимостью оптимальной (энергоэффективной) частоты вращения ДВС от мощности нагрузки (рис. 3).

Анализ диаграмм подтверждает, что система регулирования ДГПЧВ на основе АГКЗ и АВН обеспечивает требуемые показатели качества как в статике (стабилизация напряжения в нагрузке), так и в динамике (допустимые коммутационные провалы и всплески напряжения, время переходного процесса).

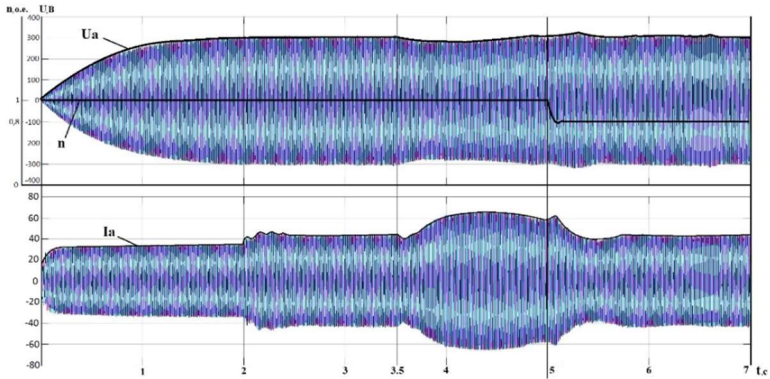


Рис. 4. Диаграмма переходных процессов ДГПЧВ на базе АГКЗ с АВН:
 U_a – амплитудное фазное напряжение АГКЗ; U_d – действующее фазное
 напряжение АГКЗ; I_a – фазный ток АГКЗ; n – частота вращения ДГПЧВ

Fig. 4. Diagram of transient processes of DGVS based on AGSCR with AVR:
 U_a – the amplitude phase voltage of the AGSCR; U_d – effective phase voltage
 of AGSCR; I_a – phase current of AGSCR; n – DGVS frequency of rotation

IV. Буферный накопитель электроэнергии

С целью повышения энергоэффективности системы целесообразно использование аккумулирующих устройств (аккумуляторов, суперконденсаторов и др.), подключаемых к звену постоянно тока (рис. 1) и предназначенных для обеспечения электроэнергией потребителей при «пиковых» нагрузках, а также при иных эксплуатационных режимах работы ДГПЧВ.

Выбор необходимой мощности БНЭ осуществляется, исходя из минимально допустимой мощности нагрузки на ДВС. При загрузке ДВС менее чем на 25 % происходят коксование внутри камеры сгорания ДВС, «залегание» поршневых и маслоъемных колец, вследствие чего сокращается срок службы ДВС. С учетом сказанного, для обеспечения надежной работы электростанции в режимах малых нагрузок установленную мощность БНЭ следует выбирать на величину не менее 25 % от номинальной мощности ДВС. На рис. 5 представлена блок-схема разработанного алгоритма коммутации БНЭ с учетом величины мощности подключенной нагрузки. Таким образом, применение БНЭ в составе дизель-генераторной электростанции позволяет повысить безаварийность работы в режимах малых нагрузок и одновременно обеспечивает работу электростанции в режимах «пиковых» нагрузок, а, следовательно, позволит снизить установленную мощность дизель-генераторного оборудования электростанции.

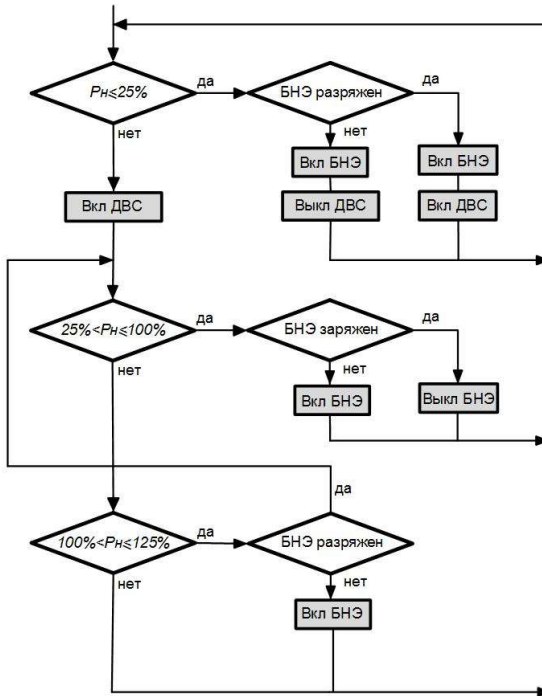


Рис. 5. Блок-схема алгоритма коммутации БНЭ

Fig. 5. Block diagram of the ESB switching algorithm

V. Заключение

Рассмотрен вариант дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения на основе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и активного выпрямителя напряжения. Показано, что применение АВН в составе ДГПЧВ позволяет использовать в качестве генератора асинхронную машину с короткозамкнутым ротором и отказаться от трансформаторного оборудования в составе электростанции, тем самым повышая надежность работы электромашиного оборудования и снижая массогабаритные показатели ДГПЧВ.

Разработанные структурные схемы и имитационные модели являются базой для исследования и разработки асинхронно-вентильных ДГПЧВ.

Поступила в редакцию 23.06.2022
Received 23.06.2022

Библиографический список

- [1] 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.
- [2] Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. – 265 с.
- [3] Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах. Новоуральск: НГТИ, 2001. – 250 с.
- [4] Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трехфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. Т. 1. № 2. С. 40-47.
- [5] Vukadinovic D., Basic M. A stand-alone induction generator with improved stator flux oriented control // Journal of Electrical Engineering. 2011. Vol. 62. № 2. P. 65-72. DOI:10.2478/v10187-011-0011-5
- [6] Mahato S.N., Singh S.P., Sharma M.P. Indirect vector control of stand-alone self-excited induction generator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.worldcomp-proceedings.com/proc/p2011/CSC4066.pdf> (дата обращения 23.05.2022).
- [7] Khvatov O.S., Kobyakov D.S. Increasing the efficiency of a diesel-generator power plant // Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91. № 12. P. 742-748. DOI: 10.3103/S106837122012007X
- [8] 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
- [9] Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Бочкарев Д.А., Ербаев Е.Т. Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 58-64.
- [10] Обухов С.Г., Плотников И.А. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // Промышленная энергетика. 2012. № 7. С. 46-51.
- [11] Delgado C., Dominguez-Navarro J.A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // proc. 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), March 25-27, 2014, Monte-Carlo, Monaco. P. 1-8. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844008

References

- [1] O.S. Khvatov, A.B. Darienkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Avtonomnye ge-neratornye ustanovki na osnove dvigatelej vnutrennego sgoraniya peremennoj chastoty vrashcheniya [Autonomous generator sets based on internal combustion engines of variable speed]*. N. Novgorod: NNSTU, 2016 (in Russian).
- [2] G.B. Onishchenko and I.L. Lokteva, *Asinhronnye ventil'nye kaskady i dvigateli dvojnogo pitaniya [Asynchronous valve stages and dual power motors]*. Moscow: Energia, 1979 (in Russian).
- [3] A.A. Efimov and R.T. Shreiner, *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemym elektro-privodah [Active converters in adjustable electric drives]*. Novouralsk: NGTI, 2001 (in Russian).
- [4] A.S. Maklakov and A.A. Radionov, "Influence of AFE rectifier with different types of PWM on supply power", *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 40-47, 2013.
- [5] D. Vukadinovic and M. Basic, "A stand-alone induction generator with improved stator flux oriented control", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 65-72, Mar. 2011. DOI:10.2478/v10187-011-0011-5
- [6] S.N. Mahato, S.R. Singh and M.R. Sharma, "Indirect vector control of stand-alone self-excited induction generator". [Online]. Available at: <https://www.worldcomp-proceedings.com/proc/p2011/CSC4066.pdf>
- [7] O.S. Khvatov and D.S. Kobayakov, "Increasing the efficiency of a diesel generator power plant", *Russian Electrical Engineering*, vol. 91, no. 12, pp. 742-748, 2020. DOI: 10.3103/S106837122012007X
- [8] O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and P.V. Kuznetsov, "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*, no. 3, pp. 93-100, 2021. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100
- [9] I.I. Artyuhov, S.F. Stepanov, D.A. Bochkarev and E.T. Erbaev, "Features build autonomous power systems on the basis of generators with variable shaft speed of rotation", *Journal of Electrotechnics*, no. 1 (6), pp. 58-64, 2015.
- [10] S.G. Obukhov and I.A. Plotnikov, "Sravnitel'nyj analiz skhem avtonomnyh elektrostantsij, ispol'zuyushchih ustanovki vozobnovlyaejmoj energetiki [Comparative analysis of schemes of autonomous power plants using renewable energy installations]", *Industrial Power Engineering*, no. 7, pp. 46-51 (in Russian).
- [11] C. Delgado and J.A. Dominguez-Navarro, "Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies", in *proc. 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, March 25-27, 2014, Monte-Carlo, Monaco, pp. 1-8. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844008

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Кобяков Дмитрий Сергеевич, аспирант 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

Dmitry S. Kobayakov, graduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation