

ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ВЕНТИЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ПО СХЕМЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

О. С. Хватов, И. А. Тарпанов, Д. С. Кобяков

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

Повышение энергоэффективности дизель-генераторных электростанций является одним из приоритетных направлений развития малой энергетики России. Для автономных объектов повышение энергоэффективности непосредственно связано с оптимизацией расхода углеводородного топлива, потребляемого судовыми дизельными двигателями. Оптимизировать топливный расход судовых дизельных двигателей можно с помощью создания дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ) – дизель-генераторных устройств с полупроводниковыми преобразователями, т. е. систем с «вентильными» генераторами. Оптимизация удельного расхода топлива ДГПЧВ (на долевых режимах нагрузки электростанции) обеспечивается принудительным регулированием скорости вращения вала приводного двигателя в соответствии с его многопараметровой характеристикой. В качестве генератора в составе судовой электростанции обычно используется электрическая машина синхронного типа; ее применение в классических дизель-генераторных установках постоянной частоты вращения более предпочтительно, чем применение электрической машины асинхронного типа. При разработке ДГПЧВ – электростанции «вентильного» типа – использование в качестве генератора асинхронной машины с фазным ротором является технически оправданным, т. к. установленная мощность преобразователя частоты в роторной цепи асинхронного генератора с фазным ротором определяется мощностью скольжения, и при ограниченном диапазоне регулирования частоты вращения ДГПЧВ существенно снижает установленную мощность силового электрооборудования электростанции. Такая силовая топология судовой электростанции называется ДГПЧВ на основе машины двойного питания. Предложен к рассмотрению вариант судовой электростанции на основе ДГПЧВ с машиной двойного питания, разработана ее функциональная схема и математическая модель. Представлена структурная схема, проведено моделирование динамических режимов амплитуды и частоты генерируемого напряжения при коммутации электрической нагрузки.

Ключевые слова: вентильная электростанция, машина двойного питания, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, задатчик экономичного режима, ассоциативная память.

Для цитирования: Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кобяков Д. С. Дизель-генераторная электростанция с вентильным генератором по схеме машины двойного питания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 82–90. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90.

Введение

В дизель-генераторных установках (ДГУ) в качестве электрического генератора, как правило, используется синхронная машина, что связано с ее технической возможностью по регулированию величины и направлению потока реактивной мощности. При создании высокоэффективных дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ) применение асинхронной машины с фазным ротором также технически обосновано, что обусловлено возможностью снижения установленной мощности преобразователя частоты (ПЧ). Для варианта ДГПЧВ на основе машины двойного питания (МДП) мощность ПЧ в роторной цепи генератора определяется мощностью скольжения, а не полной мощностью электрической машины, как при использовании синхронного генератора с ПЧ в статоре. С учетом технологически обоснованного диапазона энергоэффективных частот вращения дизеля при работе ДГПЧВ в режимах доле-

вых нагрузок (не менее 70 % от номинального значения частоты вращения) мощность ПЧ составляет не более 30 % от мощности генератора, что существенно снижает установленную мощность силового электрооборудования электростанции.

Принцип работы дизель-генераторных установок переменной частоты вращения по схеме машины двойного питания

Приведем краткое описание функциональной схемы вентильной дизель-генераторной электростанции на основе МДП. Формирование и последующая стабилизация энергоэффективной частоты вращения дизеля осуществляется с помощью блока электропривода рейки топливного насоса (ЭПН) [1, 2]. При этом формирование требуемой частоты вращения происходит в задачке экономичного режима работы (ЗЭР), на вход которого от блока вычисления мощности (ВМ) поступает информация о величине мощности нагрузки на электростанцию. Вычисление текущего значения мощности происходит с помощью датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН). Стабилизация энергоэффективной частоты вращения дизеля на режимах долевой нагрузки ДГПЧВ осуществляется средствами регулятора частоты вращения дизеля (РЧВ), структура которого может быть реализована как на базе классического ПИ-регулятора, так и с помощью аппарата нечеткой логики.

Стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии ДГПЧВ на основе МДП обеспечивает ПЧ. Система автоматического регулирования (САР) управляет ПЧ в зависимости от сигналов с ДТ, ДН, датчиков величины и частоты напряжения (ДЧ) (рис. 1).

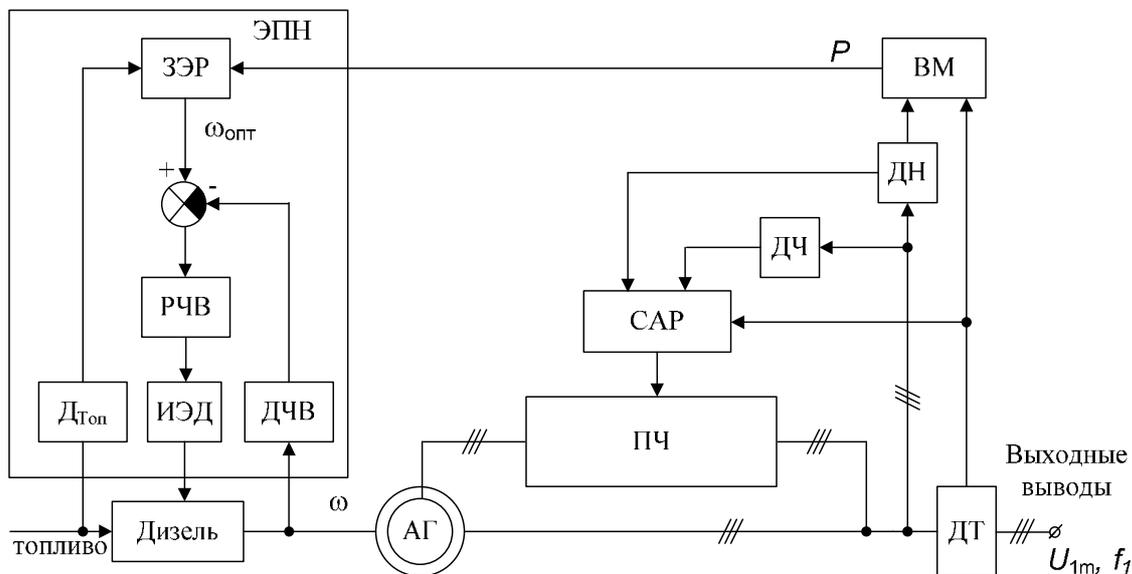


Рис. 1. Функциональная схема вентильной дизель-генераторной электростанции по схеме МДП:

ИЭД – исполнительный электродвигатель; АГ – асинхронный генератор;

Д_{топ} – датчик потребления топлива

На рис. 2 представлена функциональная схема ЗЭР, которую можно разделить на четыре основных элемента, объединенных общей информационной шиной: контроллер обучения (КО), контроллер управления (КУ), ассоциативная память (АП) и память типа Flash.

При необходимости возможно дальнейшее расширение системы для управления несколькими генераторными установками данного типа.

Ассоциативная память представляет собой многослойную нейронную сеть. Она накапливает дискретные значения оптимальной частоты вращения дизельного двигателя для различных значений мощности нагрузки электростанции. Накопленная информация позволяет АП генерировать значения оптимальной частоты вращения дизельного двигателя для отсутствующих в памяти дискрет. Таким образом, система не нуждается в знании непрерывной зависимости оптимальной частоты вращения вала дизельного двигателя от мощности нагрузки электростан-

ции $\omega_{\text{опт}} = f(P)$. Необходимо подчеркнуть, что зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ при эксплуатации ДГПЧВ постоянно уточняется в соответствии с изменениями условий работы и характеристик дизеля в процессе его износа, марки топлива и др.

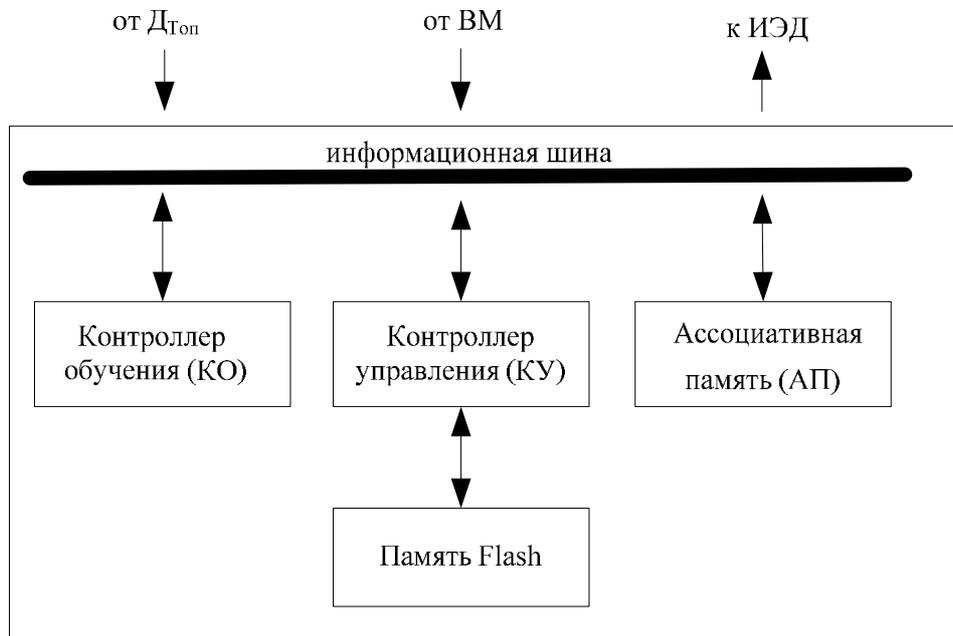


Рис. 2. Функциональная схема ЗЭР

Благодаря наличию АП ЭПН является самообучающейся системой. «Обучение» АП, производимое КО, заключается в выявлении значения $\omega_{\text{опт}}$ для конкретного значения мощности нагрузки P и расчете весов связей нейронов для получения устойчивой логической пары $P - \omega_{\text{опт}}$. Процесс определения $\omega_{\text{опт}}$ заключается в определении минимума функции расхода топлива $g_e = f(\omega)$ для конкретного значения P .

Контроллер управления обрабатывает сигналы с $D_{\text{Топ}}$ и ВМ и формирует сигнал управления на ИЭД в соответствии с $\omega_{\text{опт}}$ для текущего значения мощности нагрузки P . Если величина P входит в диапазон «обучения», то блок КУ передает ее АП, определяя тем самым величину $\omega_{\text{опт}}$. После этого происходит сопоставление значений P и частоты вращения дизеля, хранящейся в энергонезависимой памяти типа Flash. Это значение частоты вращения рассчитывается методом линейной интерполяции по накопленным в АП значениям $\omega_{\text{опт}}$ для дискретных значений P . Если расчетный и ассоциативный результаты существенно различаются на величину, превышающую заданную ошибку ξ , то АП проходит процесс «дообучения». В противном случае сигнал задания передается ИЭД. Таким образом, исключаются заведомо ложные значения $\omega_{\text{опт}}$.

Рассмотрим математическое описание элементов силового оборудования ДГПЧВ. Основным элементом ДГПЧВ является дизельный двигатель с газотурбинным наддувом, который можно описать системой дифференциальных уравнений, характеризующих его динамические свойства [3]:

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{d\mu}) y_0 &= k_1 y_n - \mu; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_{\tau} y_0 - y_n; \\ y_n (T_{\kappa} p + \delta_{\kappa}) &= y_{\tau} - k_{\kappa} y_0; \\ (T_{ax} p + \delta_d) y_0 &= x_0 + k_d y_n; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_h x_0 + k_{\tau} y_0 - y_n; \\ k_q q_{\text{ц}} &= x_0 + \theta_{\phi} y_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $y_0, y_H, \mu, y_T, x_0, q$ – безразмерные величины изменения частоты вращения вала дизеля, давления нагнетаемого воздуха, нагрузки дизеля, частоты вращения ротора турбины, положения рейки топливного насоса и цикловой подачи топлива; $T_{ам}, T_T, T_K, T_{ax}$ – постоянные времени дизеля в канале нагрузочного воздействия, турбонагнетателя, впускного коллектора и дизеля в канале регуляторного воздействия.

Математическая модель МДП-генератора, построенная на базе уравнений Парка – Горева, в системе синхронно вращающихся координат, вращающейся с частотой поля статора ω_1 [3]:

$$\left. \begin{aligned} U_{1X} / \omega_1 &= \omega J_{\Sigma} p / I_{1X}; \\ U_{1Y} &= -\omega_1 X_1 I_{1Y} + \omega_1 X_m I_{2Y}; \\ U_{2X} &= R_2 I_{2X} + p \sigma X_2 I_{2X} - E_{2Y}; \\ U_{2Y} &= R_2 I_{2Y} + p \sigma X_2 I_{2Y} + E_{2X}; \\ \Psi_{1X} &= X_1 I_{1X} + X_m I_{2X}; \\ \Psi_{1Y} &= X_1 I_{1Y} + X_m I_{2Y}; \\ \Psi_{2X} &= \sigma X_2 I_{2X} + X_m I_{1X}; \\ \Psi_{2Y} &= \sigma X_2 I_{2Y} + X_m I_{1Y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $U_{1X}, U_{1Y}, U_{2X}, U_{2Y}$ – проекции векторов напряжения статора и ротора на осях X и Y ортогональной системы координат; $I_{1X}, I_{1Y}, I_{2X}, I_{2Y}$ – проекции векторов токов статора и ротора на осях X и Y ; $\Psi_{1X}, \Psi_{1Y}, \Psi_{2X}, \Psi_{2Y}$ – проекции векторов потокоцеплений на осях X и Y .

Нагрузка вентильной электростанции по схеме МДП описывается системой уравнений [3]:

$$\left. \begin{aligned} U_{1X} &= R_n I_{nX} + x_n I_{nX} + L_n \frac{dI_{nX}}{dt}; \\ U_{1Y} &= R_n I_{nY} + x_n I_{nY} + L_n \frac{dI_{nY}}{dt}; \\ I_{nX} &= I_{1X} + I_{ПЧX}; \\ I_{nY} &= I_{1Y} + I_{ПЧY}; \\ \Delta P &= P_{ген} - P_{наг}; \\ \omega_1 - \omega_{эТ} &= \frac{d}{dt} \Delta \alpha; \\ \Delta \alpha &\approx \Delta P; \\ (I_{Pген} - I_{Pнаг}) K_{св} &\approx \Delta U_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R_2 – активное сопротивление ротора генератора; L_n – индуктивность нагрузки; X_1, X_2, X_m, R_n, X_n – реактивные сопротивления статора и ротора и цепи намагничивания, активное и реактивное сопротивление нагрузки; I_{nX}, I_{nY} – проекции вектора тока нагрузки на осях X и Y ; $I_{ПЧX}, I_{ПЧY}$ – проекции обобщенного вектора тока ПЧ на стороне сети; $P_{ген}, P_{наг}$ – активные мощности МДП и нагрузки соответственно; $\omega_{эТ}$ – эталонное значение частоты напряжения статора МДП.

На рис. 3 представлена структурная схема имитационной модели ДГПЧВ, разработанная на основе систем уравнений (1)–(3).

В соответствии со структурной схемой в пакете MatLab разработана имитационная модель ДГПЧВ на основе МДП (в тексте статьи не приведена). На рис. 4 представлены результаты имитационного эксперимента динамических режимов коммутации нагрузки на ДГПЧ по схеме МДП, в частности подключение 100 % активной и реактивной нагрузки.

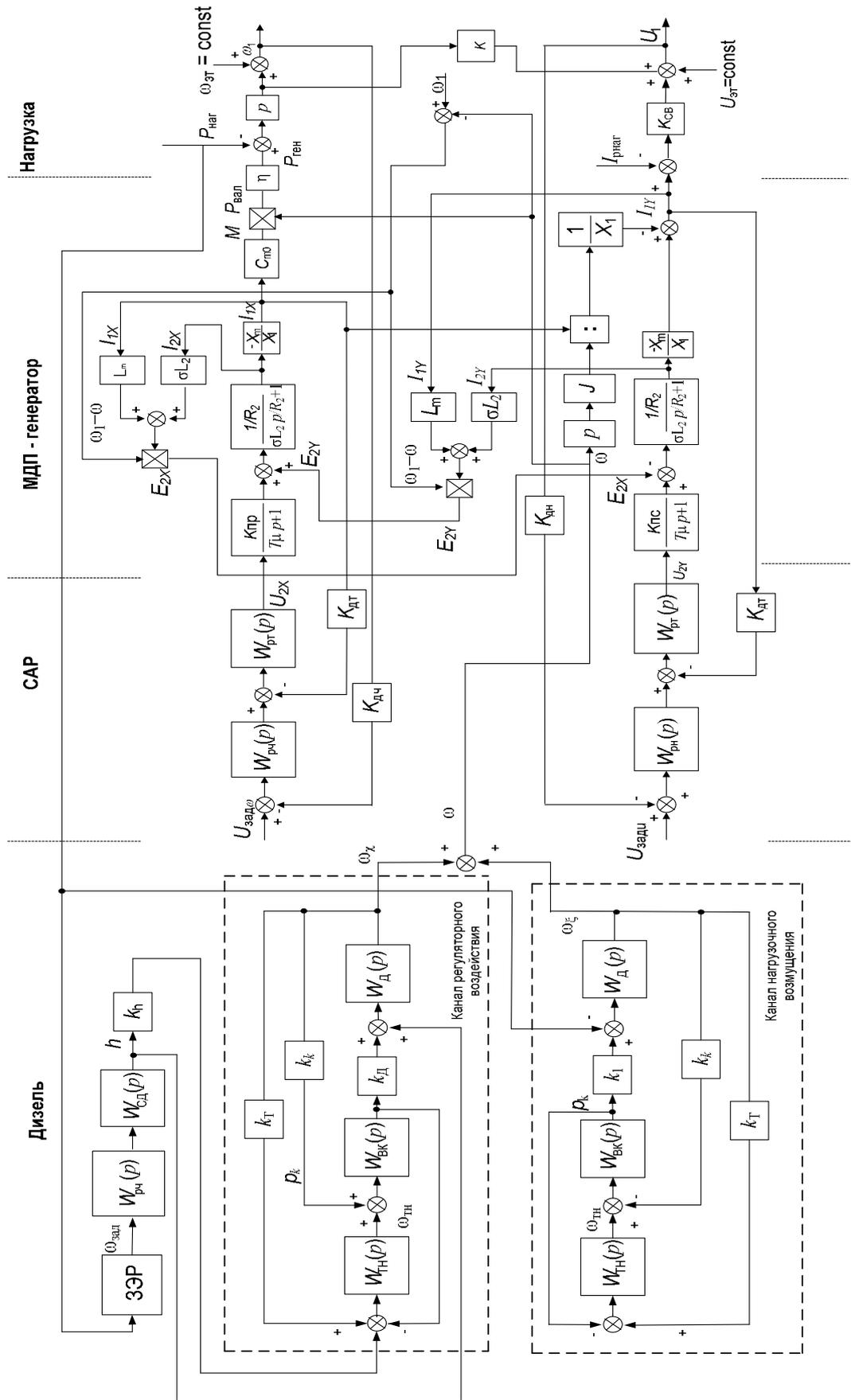


Рис. 3. Структурная схема вентильной дизель-генераторной электростанции по схеме МДП

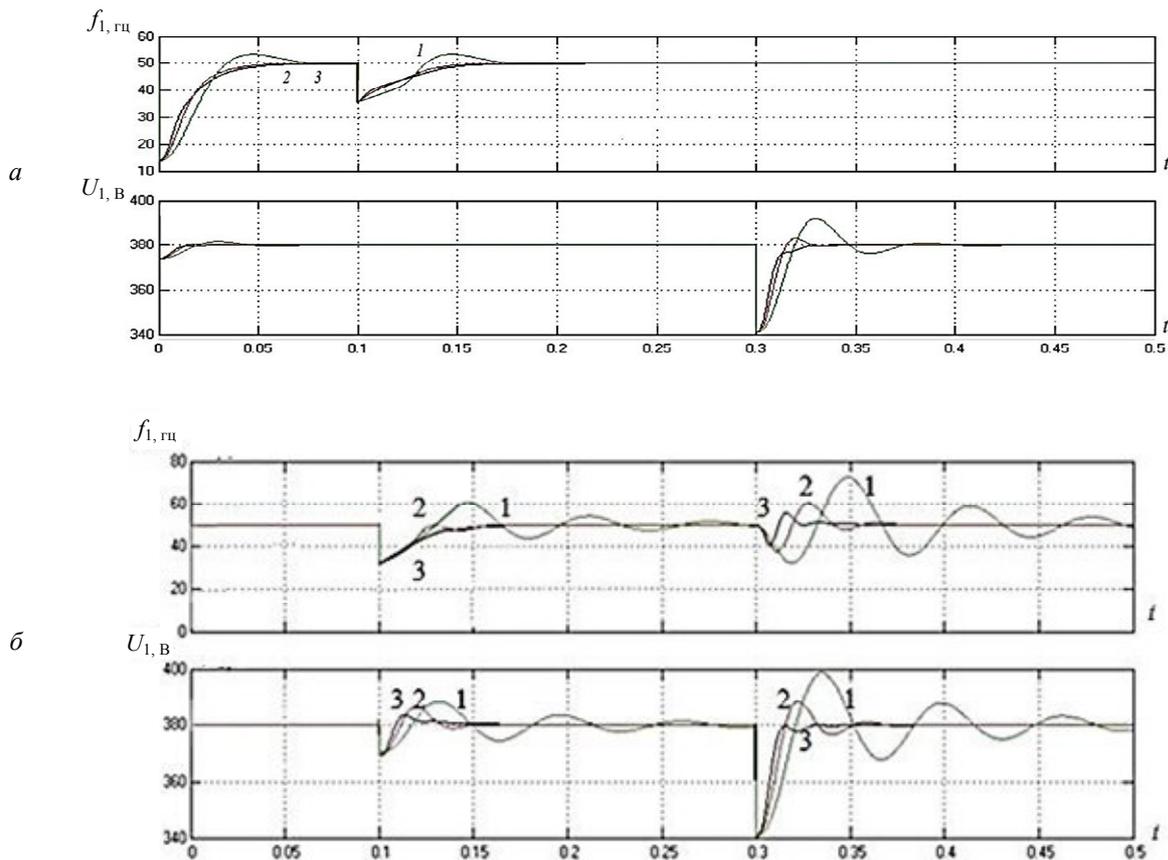


Рис. 4. Зависимости $U_1(t)$ и $f_1(t)$ при подключении нагрузки $S_{ном} = P_{ном}(\cos\varphi_{наг} = 1)$, $t = 0,1$ с;
 $S_{ном} = Q_{ном}(\cos\varphi_{наг} = 0)$, $t = 0,3$ с; 1 – $s_{настр} = 0,2$; 2 – $s_{настр} = 0,5$; 3 – $s_{настр} = 1$;
 а – без учета перекрестных связей; б – с учетом перекрестных связей

Результаты представлены как для системы без учета перекрестных связей (рис. 4, а), так и для системы с учетом перекрестных связей между контурами регулирования (рис. 4, б) при настройке регуляторов тока на различные скольжения ($s_{настр}$).

Параметры МДП-генератора: $P = 160$ кВт; $\eta = 0,925$; $U = 380$ В; $I_{1H} = 170$ А; $n_H = 1\,455$ об/мин; $I_2 = 325$ А; $\cos\varphi = 0,89$; $K_{ТР} = 2,18$; $I_\mu = 50$ А; $X_1 = 6,762$ Ом; $X_2 = 6,489$ Ом; $X_M = 6,416$ Ом; $R_1 = 0,0387$ Ом; $R_2 = 0,01565$ Ом.

Преобразователь частоты в схеме представлен в виде аperiodического звена с передаточными коэффициентами $K_{Гс} = 45$, $K_{Гр} = 45$ и постоянной времени $T_\mu = 0,002$ с. Коэффициенты передачи ДТ, а также датчиков амплитуды и частоты напряжения равны соответственно: $K_{ДТ}(\text{АГ1}) = 0,015$ мВ/А; $K_{ДТ}(\text{АГ2}) = 0,003$ мВ/А; $K_{Дн} = 0,013$, $K_{Дч} = 0,01$ мВ/Гц.

Первоначальные провалы амплитуды и частоты напряжения не зависят от наличия перекрестных связей между контурами регулирования ДППЧВ. Отметим, что игнорирование действия перекрестных связей приводит к некоторому снижению колебательности и времени переходных процессов в контурах регулирования параметров генерируемой ДППЧВ электроэнергии. При этом результаты моделирования подтверждают обеспечение стабилизации параметров генерируемой электроэнергии и требуемых (согласно Морскому Регистру Судоходства) показателей качества регулирования в динамике (допустимых значений провалов и всплесков амплитуды и частоты напряжения) ДППЧВ на режимах долевой нагрузки при соответствующих значениях энергоэффективной частоты вращения дизеля.

Заключение

Предложен вариант судовой вентильной дизель-генераторной электростанции на основе ДГПЧВ по схеме МДП [4–6]. Разработаны функциональная и структурная схемы данного варианта вентильной дизель-генераторной электростанции. Представлено математическое описание электростанции. Проведено моделирование динамических режимов амплитуды и частоты выходного напряжения электростанции при коммутации нагрузки на режимах долевой нагрузки электростанции. Проиллюстрировано, что применение интеллектуальных средств управления в составе дизель-генераторных электростанций с переменной частотой вращения вала позволяет реализовать новый подход к управлению скоростью дизельного двигателя [7–9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хватов С. В., Тутов В. Г., Хватов О. С.* Управляемые автономные асинхронные генераторы для малой энергетики // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. 2004. № 6. С. 99–109.
2. *Khvatov O. S., Dar'enkov A. B.* Power plant based on a variable-speed diesel generator // Russian Electrical Engineering. 2014. N. 3. P. 145–149.
3. *Хватов О. С.* Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: моногр. Н. Новгород: Изд-во ВГУВТ, 2015. 275 с.
4. *Abad G., Lopez J., Rodriguez M. A., Iwanski G.* Double fed induction machine. Modeling and control for wind energy generation. N. Y.: John Wiley & Sons, 2011. 633 p.
5. *Ляпин А. С.* Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением // Науч.-техн. вестн. Информац. технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 731–737.
6. *Григорьев А. В., Петухов В. А.* Современные и перспективные судовые валогенераторные установки. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. 176 с.
7. *Пронин М. В., Воронцов А. Г., Бажанова А. А., Келеш Ф. Г.* Экспериментальные исследования системы с асинхронизированным генератором-двигателем и каскадным преобразователем частоты // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 50–60.
8. *Понкратов А. С., Мирошник Д. Н.* Использование машины двойного питания в качестве генератора переменного тока // Инновационные перспективы Донбасса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Донецк, 02–22 мая 2015 г.). Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2015. С. 12–21.
9. *Крутов В. И.* Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1979. 615 с.

Статья поступила в редакцию 01.06.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хватов Олег Станиславович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой электротехники и электрооборудования 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 электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Fillin2003@mail.ru.

Кобяков Дмитрий Сергеевич – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; era-guitar@mail.ru.



VARIABLE DIESEL-GENERATOR POWER PLANT BASED ON DOUBLE-FED MACHINE

O. S. Khvatov, I. A. Tarpanov, D. S. Kobayakov

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

Abstract. The article considers the problem of improving power efficiency of the diesel generator power plants as one of the priority objectives for development of low power generation in Russia. Improving energy efficiency for autonomous facilities is directly related to the optimization of hydrocarbon fuel consumption by marine diesel engines. It is possible to optimize the fuel consumption of internal combustion engines by creating variable-speed diesel generators (VSDG), which are diesel-generator units with semiconductor converters, i.e. systems with valved generators. Optimization of specific fuel consumption by VSDG is provided by the forced regulation of the rotational speed of the shaft of the internal combustion engine in accordance with its multi-parameter characteristic in the shared load conditions of the power plant. The synchronous electric machine is used as a generator as part of a ship power station. Its use in the classic constant-speed diesel generators is more preferable than an asynchronous electric machine. In the development of VSDG - valved power plant - the use of an electric machine with a phase rotor as a generator is technically justified, because the installed capacity of the frequency converter in the rotor circuit of an asynchronous generator with a phase rotor is determined by the sliding power and, with a limited range of speed control, SDGV significantly reduces the installed capacity of the electrical equipment. Such power topology of a ship's power plant is called VSDG based on a dual-power machine. There has been proposed to consider a variant of a ship power plant based on VSDG with a dual-power machine. Its functional diagram and mathematical model are developed. A structural diagram is presented and dynamic modes of the amplitude and frequency of the generated voltage are modeled during electrical load switching.

Key words: valved power station, dual power machine, variable speed diesel generator, power saving controller, associative memory.

For citation: Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kobayakov D. S. Variable diesel-generator power plant based on double-fed machine. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:82-90. (InRuss.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90.

REFERENCES

1. Khvatov S. V., Titov V. G., Khvatov O. S. Upravliaemye avtonomnye asinkhronnye generator dlia maloi energetiki [Controlled autonomous asynchronous generators for small-scale energy supply. *Problemy sozdaniia i ekspluatatsii novykh tipov elektroenergeticheskogo oborudovaniia*, 2004, no. 6, pp. 99-109.
2. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B. Power plant based on a variable-speed diesel generator. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 3, pp. 145-149.
3. Khvatov O. S. *Elektrotekhnicheskie generatormnye komplekсы peremennoi chastoty vrashcheniia na osnove mashiny dvoynogo pitaniia: monografiia* [Electrotechnical generator complexes of variable speed based on dual-power machine: monograph]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo VGUVT, 2015. 275 p.
4. Abad G., Lopez J., Rodriguez M. A., Iwanski G. *Double fed induction machine. Modeling and control for wind energy generation*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2011. 633 p.
5. Liapin A. S. Model'noe issledovanie mashiny dvoynogo pitaniia s tokovym upravleniem [Model study of dual-current machine with current control]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 731-737.
6. Grigor'ev A. V., Petukhov V. A. *Sovremennyei perspektivnye sudovye valogeneratormnye ustanovki* [Modern and promising ship shaft generator sets]. Saint-Petersburg, Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009. 176 p.
7. Pronin M. V., Vorontsov A. G., Bazhanova A. A., Kelesh F. G. Eksperimental'nye issledovaniia sistemy s asinkhronizirovannym generatorom-dvigatelem i kaskadnym preobrazovatelem chastoty [Experimental studies of system with asynchronous generator-motor and cascade frequency converter]. *Izvestiia SPbGETU «LETI»*, 2017, no. 4, pp. 50-60.
8. Ponkratov A. S., Miroshnik D. N. Ispol'zovanie mashiny dvoynogo pitaniia v kachestve generator peremennogo toka. Innovatsionnye perspektivy Donbassa [Using dual power machine as alternator. Innovative

prospects of Donbass]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Donetsk, 02–22 maia 2015 g.)*. Donetsk, Izd-vo DonNTU, 2015, pp. 12-21.

9. Krutov V. I. *Avtomatičeskoe regulirovanie dvigatelei vnutrennego sgoraniia: uchebnoe posobie* [Automatic regulation of internal combustion engines: tutorial]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 615 p.

The article submitted to the editors 01.06.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Kobyakov Dmitry Sergeevich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; epa-guitar@mail.ru.

