

УДК 621.314

Имитационная модель единой судовой электростанции на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения

О.С. Хватов, д-р техн. наук, А.Б. Дарьенков, канд. техн. наук, И.С. Самоявчев, асп.

Приведено описание функциональной и структурной схем единой электростанции судна на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения. Рассмотрены результаты работы имитационной модели единой электростанции судна.

Ключевые слова: единая электростанция, двигатель внутреннего сгорания, синхронный генератор, синхронный двигатель, преобразователь частоты.

Simulation model of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft

O.S. Khvatov, doctor of science, A.B. Daryenkov, candidate of science, I.S. Samoyavchev, graduate student

The description of the flow and structure sheets of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft. The consideration the results of simulation for unified electric power station of ship.

Keywords: unified electric power station, explosion engine, synchro generator, synchro motor, converter.

На судах с электродвижением получили широкое распространение единые электростанции (ЕЭС), от которых получают питание все потребители электроэнергии, в том числе гребные электродвигатели. Применение ЕЭС позволяет повысить надежность и упростить обслуживание энергосистемы судна за счет уменьшения количества составляющих ее компонентов. В качестве первичных двигателей ЕЭС зачастую используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Основным недостатком электростанций на базе ДВС – низкий КПД. Одним из вариантов повышения экономичности ЕЭС является применение ДВС с переменной скоростью вращения [1]. Экономия топлива достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной скорости вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива.

Функциональная схема предлагаемой ЕЭС судна на базе ДВС с переменной скоростью вращения представлена на рис. 1 [2].

ЕЭС построена на базе ДВС 1, приводящего во вращение синхронный генератор (СГ) 2. Гребной винт 6 приводится во вращение синхронным двигателем (СД) 5. Система работает следующим образом. Блок 14 формирования оптимальной скорости вращения (БОС) ДВС 1 задает скорость вращения его вала, оптимальную с точки зрения потребления топлива. Блок 14 формирует выходной сигнал согласно заложенной в его памяти многопараметровой характеристики ДВС в зависимости от выходных сигналов блока 15 вычисления мощности нагрузки (БМН) и датчика 8 скорости вращения ДВС [3]. Многопараметровая характеристика представляет собой зависимость эффективной

мощности ДВС от скорости вращения его вала дизеля при наименьшем удельном расходе топлива. Блок 15 определяет мощность нагрузки на основе сигналов от датчиков тока 9, 10 и датчиков напряжения 11, 12. В соответствии с требуемой скоростью движения судна задатчик частоты 16 формирует сигнал задания частоты выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ) 3 и тем самым определяет скорость вращения гребного электродвигателя 5. Блок регулирования частоты 17 формирует сигнал управления частотой ПЧ 3 на основе сигналов от задатчика частоты 16 и датчика 13 скорости вращения гребного электродвигателя. Таким образом, ПЧ 3 является согласующим элементом между СД 5 и СГ 2, работающими с разными скоростями вращения. Для питания электропотребителей судна на выходе СГ включен ПЧ 4, который обеспечивает стабильные значения амплитуды и частоты напряжения бортовой сети.

Для исследования ЕЭС в различных режимах работы разработана ее математическая модель. В качестве генератора и гребного электродвигателя ЕЭС (рис. 1) используются синхронные машины (СМ). При разработке математической модели СМ приняты следующие допущения: потери в стали, а также зависимость активных сопротивлений от температуры не учитываются; обмотки статора симметричны; высшие пространственные гармоники поля отсутствуют.

Математическая модель СМ построена на основе уравнений Парка-Горева [4], все величины представлены в системе координат d и q , вращающейся синхронно с ротором. Ток, напряжение и параметры обмотки возбуждения приведены к статору.

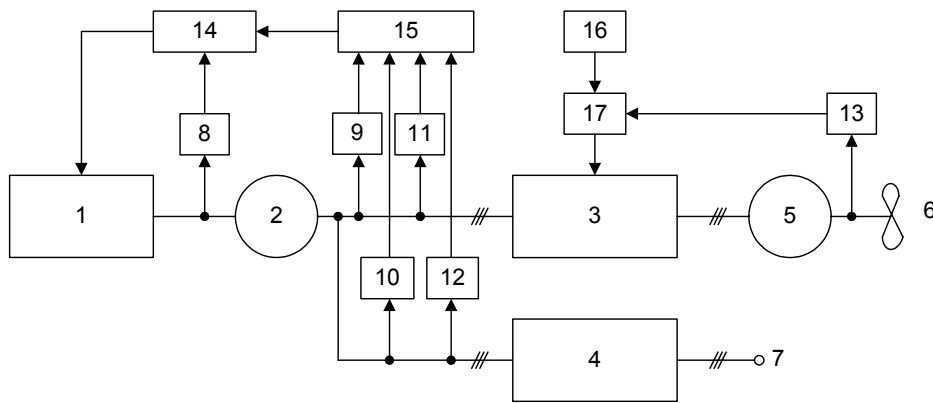


Рис. 1. Функциональная схема ЕЭС судна на базе ДВС с переменной скоростью вращения: 1 – ДВС; 2 – синхронный генератор; 3, 4 – преобразователи частоты; 5 – гребной синхронный двигатель; 6 – гребной винт; 7 – выходы для подключения потребителей судовой сети; 8 – датчик скорости вращения ДВС; 9, 10 – датчики тока; 11, 12 – датчики напряжения; 13 – датчик скорости вращения гребного винта; 14 – БОС; 15 – БМН; 16 – задатчик частоты; 17 – блок регулирования частоты

Система уравнений, описывающая СМ, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= r_s i_{sd} + p \psi_{sd} - \psi_{sq} \omega, \\ u_{sq} &= r_s i_{sq} + p \psi_{sq} + \psi_{sd} \omega, \\ u_f &= r_f i_f + p \psi_f, \\ \psi_{sd} &= L_d i_{sd} + L_{ad} i_f + L_{ad} i_{\partial d}, \\ \psi_{sq} &= L_q i_{sq} + L_{aq} i_{\partial q}, \\ \psi_{\partial d} &= \psi_{md} + L_{\partial d \sigma} i_{\partial d}, \\ \psi_{\partial q} &= \psi_{mq} + L_{\partial q \sigma} i_{\partial q}, \\ \psi_f &= \psi_{md} + L_{f \sigma} i_f, \\ \pm J \frac{d\omega}{dt} + M &= \frac{3}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}), \end{aligned} \right\} (1)$$

где u_{sd}, u_{sq}, u_f – проекции вектора напряжения статора на оси d и q , напряжение ротора соответственно; $i_{sd}, i_{sq}, i_f, i_{\partial d}, i_{\partial q}$ – проекции вектора тока статора на оси d и q , ток ротора, демпферные токи соответственно; $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_f, \psi_{\partial d}, \psi_{\partial q}$ – проекции потокосцепления статора на оси d и q , потокосцепление ротора, потокосцепления демпферных контуров соответственно; r_s, r_f – активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно; $L_d, L_q, L_{ad}, L_{aq}, L_{\partial d \sigma}, L_{\partial q \sigma}, L_{f \sigma}$ – индуктивности статора по осям d и q , взаимная индуктивность обмоток статора и ротора по осям d и q , индуктивности рассеяния демпферных контуров по осям d и q , индуктивность ротора от потоков рассеяния соответственно; M, J – момент на валу генератора (двигателя), суммарный момент инерции.

В качестве первичного двигателя ЕЭС (рис. 1) выбран дизель с газотурбинным наддувом, который описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{d\mu}) y_0 &= k_1 y_H - \mu, \\ (T_m p + \delta_m) y_m &= k_m y_0 - y_H, \\ y_H (T_\kappa p + \delta_\kappa) &= y_m - k_\kappa y_0, \\ (T_{a\chi} p + \delta_d) y_0 &= \chi_0 + k_d y_H, \\ (T_m p + \delta_m) y_m &= k_h \chi_0 + k_m y_0 - y_H, \\ k_g g_u &= \chi_0 + \theta_\phi y_0, \end{aligned} \right\} (2)$$

где $y_0, \mu_0, y_H, y_T, \chi_0, g_u$ – безразмерные величины изменения соответственно скорости вращения вала и нагрузки дизеля, давления нагнетаемого воздуха, скорости вращения ротора турбины, положения рейки топливного насоса и цикловой подачи топлива; $T_{a\mu}, T_{a\chi}, T_T, T_\kappa$ – постоянные времени соответственно дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $T_{a\mu} \approx T_{a\chi}$), турбонагнетателя и впускного коллектора; $\delta_{d\mu}, \delta_d, \delta_T, \delta_\kappa$ – коэффициенты самовыравнивания соответственно дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $\delta_d \approx \delta_{d\mu}$), турбонагнетателя и впускного коллектора; $k_1, k_d, k_T, k_\kappa, k_h$ – коэффициенты, учитывающие соответственно зависимость крутящего момента на валу дизеля от давления наддува, изменение момента сопротивления на валу дизеля при изменении мощности нагрузки; зависимость расхода воздуха через дизель от скорости его вращения; зависимость крутящего момента турбины от ее скорости вращения и положения рейки топливного насоса; k_g, θ_ϕ – соответственно коэффициенты самовыравнивания дизеля и усиления топливоподающей аппаратуры дизеля.

Математическая модель гребного винта описывается уравнением [6]

$$M_g = K_2 \rho n^2 D_p^5, \quad (3)$$

где M_B, ρ, K_2, n, D_p – момент на валу гребного винта, плотность воды, безразмерный коэффициент момента гребного винта, частота вращения винта, диаметр гребного винта соответственно.

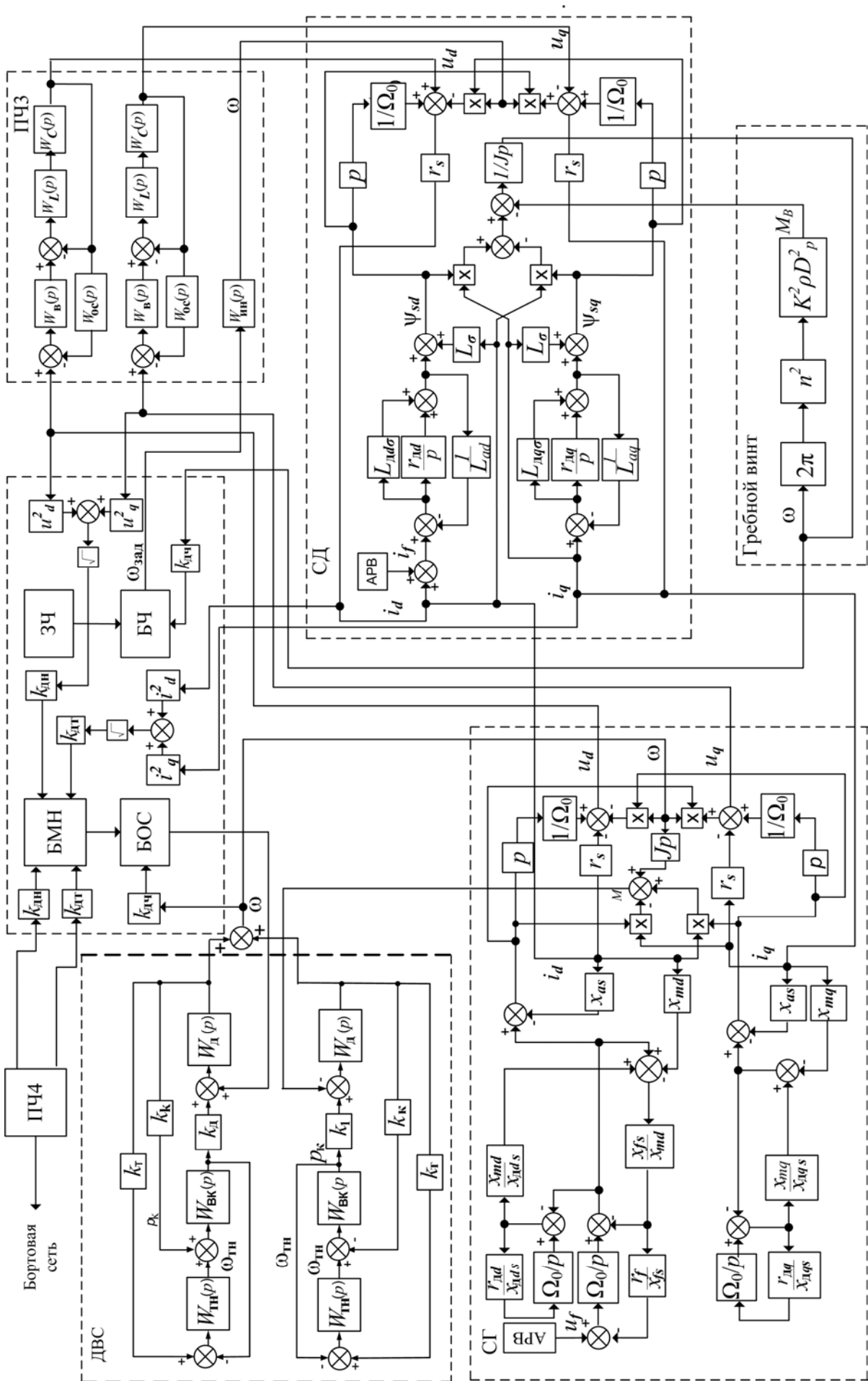


Рис. 2. Структурная схема ЕЭС судна на базе ДВС с переменной скоростью вращения: $W_e(p)$, $W_{sc}(p)$, $W_L(p)$, $W_C(p)$, $W_{\Omega}(p)$, $W_{\Omega_0}(p)$, $W_{\Omega_1}(p)$, $W_{\Omega_2}(p)$, $W_{\Omega_3}(p)$, $W_{\Omega_4}(p)$, $W_{\Omega_5}(p)$, $W_{\Omega_6}(p)$, $W_{\Omega_7}(p)$, $W_{\Omega_8}(p)$, $W_{\Omega_9}(p)$, $W_{\Omega_{10}}(p)$, $W_{\Omega_{11}}(p)$, $W_{\Omega_{12}}(p)$, $W_{\Omega_{13}}(p)$, $W_{\Omega_{14}}(p)$, $W_{\Omega_{15}}(p)$, $W_{\Omega_{16}}(p)$, $W_{\Omega_{17}}(p)$, $W_{\Omega_{18}}(p)$, $W_{\Omega_{19}}(p)$, $W_{\Omega_{20}}(p)$ – передаточные функции выпрямителя ПЧ, обратной связи, индуктивности и емкости фильтра, инвертора соответственно; $W_{\Omega}(p)$, $W_{\Omega_0}(p)$, $W_{\Omega_1}(p)$, $W_{\Omega_2}(p)$, $W_{\Omega_3}(p)$, $W_{\Omega_4}(p)$, $W_{\Omega_5}(p)$, $W_{\Omega_6}(p)$, $W_{\Omega_7}(p)$, $W_{\Omega_8}(p)$, $W_{\Omega_9}(p)$, $W_{\Omega_{10}}(p)$, $W_{\Omega_{11}}(p)$, $W_{\Omega_{12}}(p)$, $W_{\Omega_{13}}(p)$, $W_{\Omega_{14}}(p)$, $W_{\Omega_{15}}(p)$, $W_{\Omega_{16}}(p)$, $W_{\Omega_{17}}(p)$, $W_{\Omega_{18}}(p)$, $W_{\Omega_{19}}(p)$, $W_{\Omega_{20}}(p)$ – передаточные функции турбонагнетателя, впускного коллектора, собственно двигателя соответственно; АРВ – автоматический регулятор возбуждения; $\omega_{зад}$ – заданная частота вращения СД

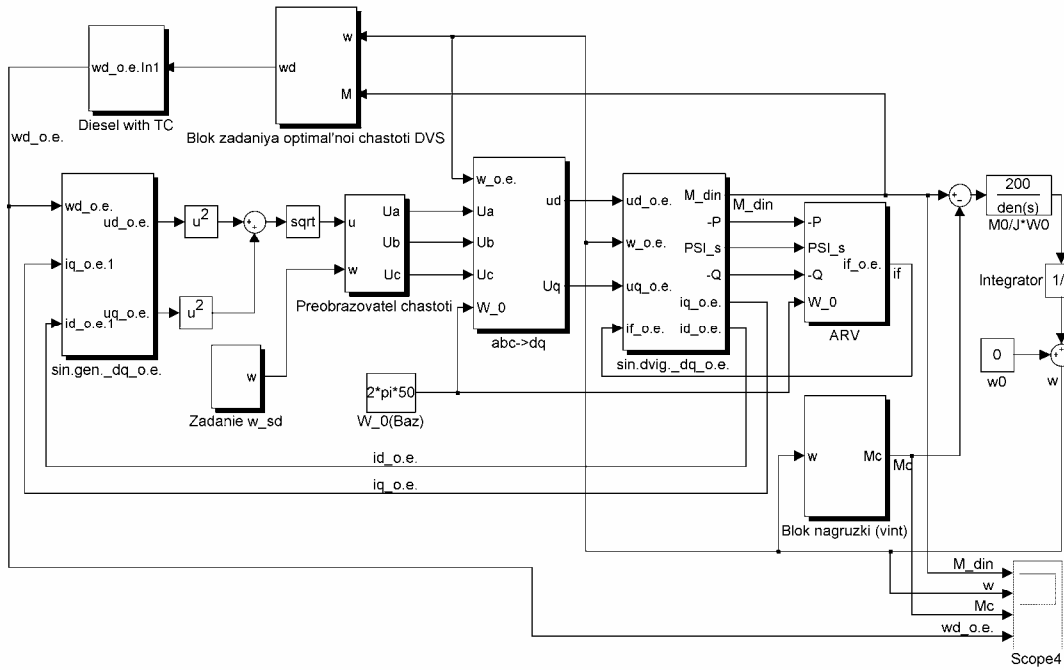


Рис. 3. Имитационная модель ЕЭС на базе ДВС с переменной скоростью вращения в пакете Matlab Simulink

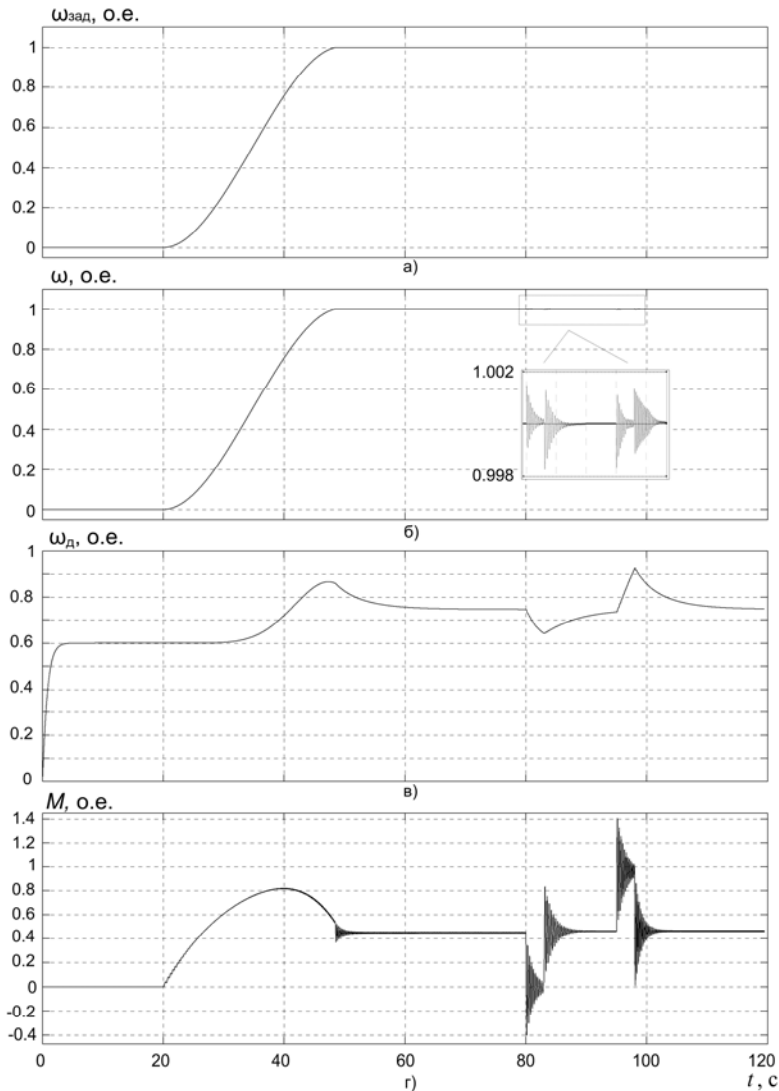


Рис. 4. Результаты моделирования ЕЭС в системе Matlab Simulink: а – задание на скорость вращения вала СД (гребного винта); б – изменение скорости вращения вала СД (гребного винта); в – изменение скорости вращения дизеля; г – изменение момента на валу СД (гребном винте)

На основе систем уравнений (1)–(3) разработана структурная схема ЕЭС судна на базе ДВС с переменной скоростью вращения (рис. 2). По структурной схеме (рис. 2) в пакете Matlab Simulink разработана имитационная модель ЕЭС (рис. 3). Имитационная модель построена в системе относительных единиц и позволяет анализировать динамические и статические режимы работы ЕЭС, а также осуществлять синтез регуляторов системы автоматического управления.

В качестве примера работы имитационной модели на рис. 4 приведены результаты моделирования для ЕЭС, состоящей из трехфазного дизель-генератора типа SDMO J 66K (номинальные параметры: выходная мощность 48 кВт, выходное напряжение 230/400 В, частота вращения 1500 об/мин) и гребного двигателя, в качестве которого выбрана СМ типа Bearford WT-224D (номинальные параметры: мощность 40 кВт, напряжение 230/400 В, частота вращения 1500 об/мин). В частности, моделировался плавный пуск СД по S-образной характеристике (рис. 4, а, б), режимы оголения винта с моментом нагрузки на винте, а следовательно, и на СД, равном нулю ($M = 0$ о.е.), и ударное возрастание нагрузки ($M = 0,95$ о.е.) (рис. 4, г). При работе с моментом сопротивления на гребном винте, близким к нулю, скорость вращения вала ДВС равна 60 % от номинального значения ($\omega_d = 0,6$ о.е.), а при работе с $M = 0,45$ о.е. – $\omega_d = 0,85$ о.е. При оголении винта, когда момент M снижается до нуля, скорость дизеля начинает уменьшаться и стремится к скорости, соответствующей нулевой мощности нагрузки. При ударной нагрузке скорость дизеля увеличивается и в переходном процессе превышает номинальное значение.

Заключение

Применение ЕЭС судна на базе ДВС с переменной скоростью вращения вала обеспечивает оптимальный расход топлива при одновременном поддержании на заданном уровне скорости вращения гребного винта, необходимой для конкретного режима хода судна. Реализация оптимального режима работы ДВС с переменной скоростью вращения требует нового подхода к управлению топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной управляющей системы [7].

ЕЭС на базе ДВС с переменной скоростью вращения могут применяться как на судах различного назначения речного и морского плавания, так и на других автономных объектах, таких как автомобиль, трактор, локомотив и др.

Список литературы

1. Орлов А.В., Путятинский В.А., Сапожников В.В. Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения // Судостроение. – 1976. – № 10. – С. 28–29.
2. Самоявчев И.С., Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Единая электростанция автономного объекта на базе ДВС переменной частоты вращения: тез. докл. IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. / НГТУ. – Н.Новгород, 2010. – С. 62–63.
3. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 53–56.
4. Ковач К.П., Рац И.М. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
6. Полонский В.И. Гребные электрические установки. – Л.: Морской транспорт, 1958.
7. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 4. – С. 126–131.

Хватов Олег Станиславович,

Волжская государственная академия инженеров водного транспорта,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,
телефон (831) 4-193-439,
e-mail: khvatov@aquasci.nnov.ru

Дарьенков Андрей Борисович,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов,
адрес: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24, ауд. 1114, деканат ФАЭ,
телефон (831) 4-369-379,
e-mail: fae@nntu.nnov.ru

Самоявчев Иван Сергеевич,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
аспирант,
e-mail: fae@nntu.nnov.ru