

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

О.С. Хватов², А.Б. Дарьенков¹, И.А. Тарпанов², В.В. Пшеничников²

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Волжская государственная академия водного транспорта²

Рассмотрены математическая модель, функциональная и структурная схемы дизельной электростанции с переменной скоростью вращения на основе асинхронного генератора с фазным ротором. Приведены результаты моделирования электростанции в пакете Matlab.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, генератор, преобразователь частоты, экономичный режим.

Системы "двигатель внутреннего сгорания - генератор" представляют широкий класс электроэнергетических систем, к которому относятся установки типа "дизель-генератор" (Д-Г), "бензиновый двигатель – генератор", судовые валогенераторные установки, ветродизель-электрические установки и ряд других.

Из приведенных выше систем наибольшее распространение получили установки типа Д-Г. Они, обладая высокой надежностью, достаточно большим моторесурсом и долговечностью, незаменимы в качестве автономных источников основного или резервного электропитания. Системы Д-Г строятся, как правило, на базе генераторов переменного тока.

подавляющее большинство систем Д-Г работает со стабильной скоростью вращения (ω) вала дизеля, независимо от мощности нагрузки (P). Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива. Для обеспечения оптимального режима работы дизеля необходимо с изменением P менять ω [1]. Известно, что уменьшение ω при снижении нагрузки сокращает удельный расход топлива дизеля на 20-30%. При этом также обеспечивается оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение его износа и, следовательно, повышение моторесурса. Однако при этом должно выполняться требование стабильности частоты выходного напряжения ($f_1 = \text{const}$) при $\omega = \text{var}$.

Функциональная система Д-Г с переменной ω на базе машины двойного питания (МДП), в качестве которой используется асинхронный генератор с фазным ротором (АГ), представлена на рис. 1. Устройство работает следующим образом. Электропривод рейки топливного насоса (ЭПН) получает сигнал с блока вычислителя мощности нагрузки (ВМ), который соединен с выходами датчиков напряжения (ДН) и тока (ДТ), измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе преобразователя частоты (ПЧ). В зависимости от значения P задатчик экономичного режима работы дизеля (ЗЭР) формирует на своем выходе оптимальное значение скорости вращения $\omega_{\text{опт}}$ вала дизеля, при котором потребление топлива минимально для текущего значения P . С помощью сумматора сигналов, входящего в состав ЭПН, вычисляется разность сигнала задания $\omega_{\text{опт}}$ и сигнала датчика скорости враще-

ния вала дизеля (ДСВ). Сигнал от сумматора поступает на вход регулятора скорости вращения вала дизеля (РСВ), который с помощью исполнительного электродвигателя (ИЭД), перемещающего рейку топливного насоса, поддерживает скорость вращения вала дизеля на уровне, заданном ЗЭР. Таким образом, при изменении P на выходных выводах, а значит, и на валу дизеля, скорость вращения вала ω будет поддерживаться оптимальной с точки зрения минимального потребления топлива.

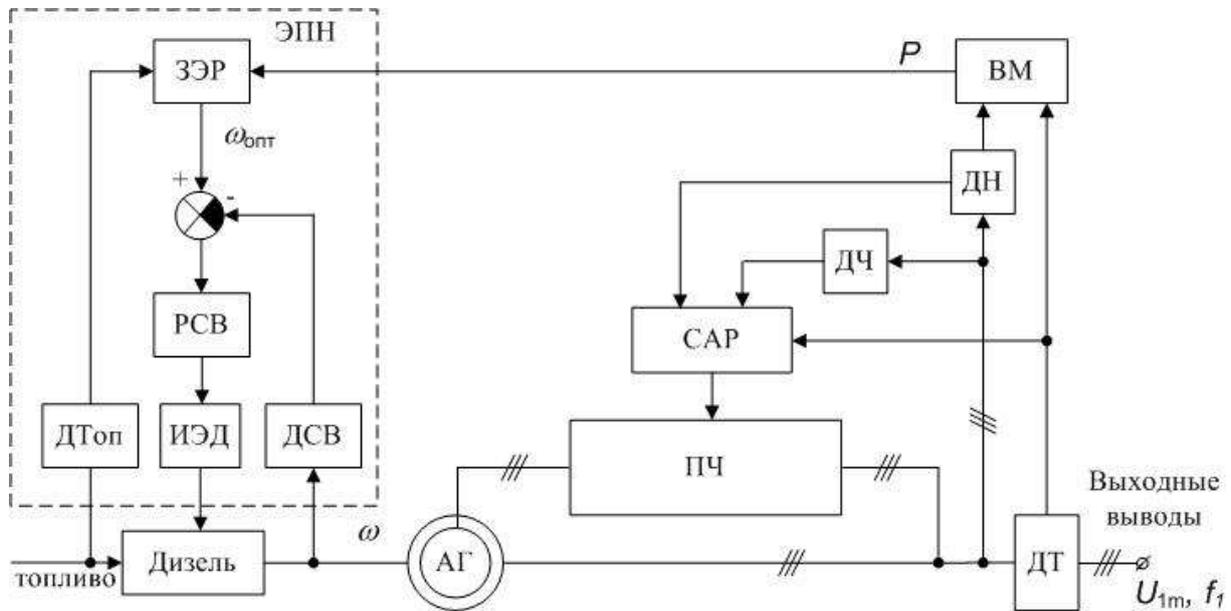


Рис. 1. Функциональная схема системы Д-Г с переменной скоростью вращения

Поскольку ω дизеля изменяется в зависимости от P , то амплитуда U_{1m} и частота f_1 переменного напряжения АГ будут также меняться в зависимости от P . При работе дизеля во всем диапазоне нагрузок стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения ($U_{1m}=\text{const}$ и $f_1=\text{const}$) возможно обеспечить за счет ПЧ, включенного в цепь ротора АГ. Система автоматического регулирования (САР) формирует сигналы управления ПЧ в функции сигналов с датчиков частоты (ДЧ), а также датчиков ДТ и ДН.

Объектом управления ЭПН является дизель с газотурбинным наддувом, который описывается системой дифференциальных уравнений, характеризующих его динамические свойства и составленных для двух случаев [2]:

- изменение состояния дизеля под влиянием нагрузки M_C при неизменной координате регуляторного воздействия – цикловой подаче g_c , однозначно связанной с ходом топливной рейки h ;
- изменение состояния дизеля под влиянием регуляторного воздействия при неизменной величине активной мощности нагрузки P .

Система уравнений дизеля с газотурбинным наддувом имеет вид

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{d\mu}) y_0 &= k_1 y_H - \mu; \\ (T_T p + \delta_T) y_T &= k_T y_0 - y_H; \\ y_H (T_K p + \delta_K) &= y_T - k_K y_0; \\ (T_{ax} p + \delta_d) y_0 &= x_0 + k_d y_H; \\ (T_T p + \delta_T) y_T &= k_h x_0 + k_T y_0 - y_H; \\ k_g g_c &= x_0 + \theta_\varphi y_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $y_0, \mu, y_n, y_T, x_0, g_{\Sigma}$ - безразмерные величины изменения, скорости вращения вала и нагрузки дизеля, давления нагнетаемого воздуха, скорости вращения ротора турбины, положения рейки топливного насоса и цикловой подачи топлива соответственно;

$T_{a\mu}, T_{ax}, T_T, T_K$ - постоянные времени, дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $T_{ax} \approx T_{a\mu}$), турбонагнетателя и впускного коллектора соответственно;

$\delta_{d\mu}, \delta_d, \delta_T, \delta_K$ - коэффициенты самовыравнивания, дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $\delta_d \approx \delta_{d\mu}$), турбонагнетателя и впускного коллектора соответственно;

k_1, k_T, k_d, k_K, k_h - коэффициенты, учитывающие, 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 и θ_ϕ - коэффициенты самовыравнивания дизеля и усиления топливоподающей аппаратуры дизеля.

Математическая модель МДП – генератора основывается на базе уравнений Парка – Горева в системе синхронно вращающихся координат, опорный вектор которой вращается с частотой поля статора ω_1 , и имеет следующий вид:

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

где $U_{1X}, U_{1Y}, U_{2X}, U_{2Y}$ - проекции векторов напряжения статора и ротора на оси X и Y ортогональной системы координат;

$I_{1X}, I_{1Y}, I_{2X}, I_{2Y}$ - проекции векторов токов статора и ротора на оси X и Y;

$\Psi_{1X}, \Psi_{1Y}, \Psi_{2X}, \Psi_{2Y}$ - проекции векторов потокосцеплений на оси X и Y;

E_{2X}, E_{2Y} - проекции ЭДС ротора на оси X и Y;

ω_1, ω, σ - частота поля статора, частота вращения ротора и коэффициент рассеяния соответственно;

J_{Σ} - суммарный момент инерции МДП, приведенный к валу дизеля;

R_2 - активное сопротивление ротора МДП;

X_1, X_2, X_m, R_n, X_n - реактивные сопротивления статора, ротора и цепи намагничивания МДП, активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Нагрузка МДП-генератора описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} U_{1X} &= R_{\text{н}} I_{\text{н}X} + x_{\text{н}} I_{\text{н}X} + L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{н}X}}{dt}; \\ U_{1Y} &= R_{\text{н}} I_{\text{н}Y} + x_{\text{н}} I_{\text{н}Y} + L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{н}Y}}{dt}; \\ I_{\text{н}X} &= I_{1X} + I_{\text{пч}X}; \\ I_{\text{н}Y} &= I_{1Y} + I_{\text{пч}Y}; \\ \Delta P &= P_{\text{ген}} - P_{\text{наг}}; \\ \omega_1 - \omega_{\text{эт}} &= \frac{d}{dt} \Delta\alpha; \\ \Delta\alpha &\sim \Delta P; \\ (I_{\text{рген}} - I_{\text{рнаг}}) \cdot Z_{\text{в}} &\approx \Delta U_1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $L_{\text{н}}$ - индуктивность нагрузки;

$I_{\text{н}X}, I_{\text{н}Y}$ - проекции вектора тока нагрузки на оси X и Y ;

$I_{\text{пч}X}, I_{\text{пч}Y}$ - проекции обобщенного вектора тока ПЧ на стороне сети, определяемого током I_2 и углами управления ПЧ, на оси X и Y ;

$P_{\text{ген}}, P_{\text{наг}}$ - активные мощности МДП и нагрузки соответственно;

$\omega_{\text{эт}}$ - эталонное значение частоты напряжения статора МДП;

$\Delta\alpha$ - изменение фазы вектора напряжения статора МДП;

$I_{\text{рген}}, I_{\text{рнаг}}$ - реактивные составляющие токов МДП и нагрузки соответственно;

$Z_{\text{в}}$ - сопротивление контура возбуждения МДП;

ΔU_1 - изменение величины напряжения статора генератора.

На основе систем уравнений (1), (2) и (3) разработана структурная схема системы Д-Г (рис. 2). Система регулирования содержит три канала: по скорости вращения ω вала дизеля, частоте f_1 и амплитуде U_{1m} выходного напряжения АГ [3].

Одной из важнейших задач при создании систем Д-Г с переменной скоростью вращения является разработка ЗЭР дизеля, который в зависимости от P должен формировать на своем выходе оптимальные, с точки зрения потребления топлива значения скорости вращения $\omega_{\text{опт}}$ вала дизеля [4]. Зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ может быть легко определена по многопараметровой характеристике дизеля. Однако, многопараметровая характеристика для каждого конкретного дизеля носит индивидуальный характер, и производители дизелей, как правило, не предоставляют таких характеристик. Кроме того, многопараметровая характеристика дизеля будет меняться в зависимости от условий внешней среды, от степени износа дизеля и марки топлива.

Функциональная схема ЗЭР приведена на рис. 3 и состоит из четырех основных элементов: контроллера обучения (КО), контроллера управления (КУ), ассоциативной памяти (АП) и памяти данных, которые объединены общей информационной шиной.

Основным функциональным элементом ЗЭР является АП, представляющая собой нейронную сеть с радиальными базисными функциями. Важное достоинство нейронных сетей данного типа – способность решать задачу аппроксимации табличной функции многих переменных, дополненной процедурой интерполяции (экстраполяции) для нахождения произвольного значения данной функции. Таким образом, АП обладает способностью накапливать дискретные значения скорости $\omega_{\text{опт}}$ в зависимости от P , а также генерировать значения $\omega_{\text{опт}}$ для отсутствующих в памяти дискрет. Это свойство освобождает ЗЭР от необходимости знания непрерывной зависимости $\omega_{\text{опт}} = f(P)$.

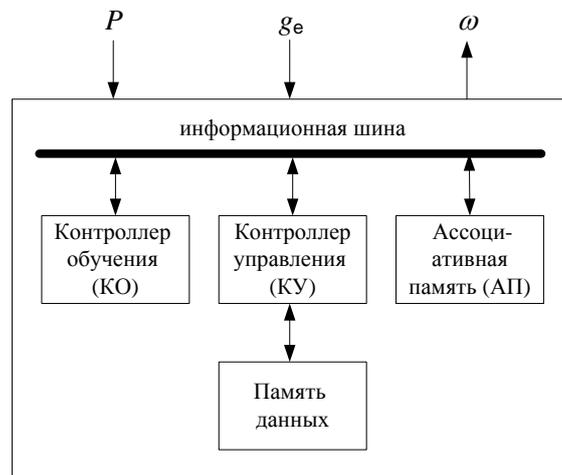


Рис. 3. Функциональная схема ЗЭР

Обучение нейронной сети осуществляется КО на основе алгоритма «обратного распространения ошибки». Целью обучения нейронной сети является такая настройка ее весов, чтобы некоторое множество значений, поданное на ее входы, приводило к получению требуемого множества выходных значений. При этом минимизируется ошибка выходного параметра $\omega_{\text{опт}}$ в соответствии с целевой функцией среднеквадратического отклонения результата работы нейронной сети от целевой функции. Используемое в процессе обучения «обучающее множество» логических пар $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ формируется КУ в процессе управления Д-Г установкой.

В случае выхода текущего значения мощности нагрузки P за пределы диапазона, в котором производилось обучение АП, соответствующее значение $\omega_{\text{опт}}$ определяется контроллером КУ. При этом контроллером КО производится «дообучение» нейронной сети АП. Точность расчета зависимости $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ и, как следствие, экономичность системы будет определяться плотностью значений и шириной диапазона обучения, который можно сравнить с накопленным «опытом» ЗЭР.

На основе структурной схемы Д-Г с переменной скоростью вращения (рис. 2) и функциональной схемы ЗЭР (рис. 3) в пакете Matlab разработана имитационная модель электростанции на базе Д-Г с переменной скоростью вращения.

Результаты моделирования для дизеля номинальной мощностью 142 кВт представлены на рис. 4. В частности, моделировался наброс нагрузки P на 100% и сброс на 30%, при этом получены зависимости изменения скорости вращения вала дизеля ω (рис. 4, а, б), а также частоты f_1 и амплитуды U_{1m} выходного напряжения системы (рис. 4, в, г) для значений $\cos\varphi$ нагрузки, равных 0,5 и 0,9. Анализ показал, что при набросе нагрузки на 100% скорость вращения ω вала дизеля увеличилась на 50% и достигла номинального значения, а при сбросе нагрузки на 30% - снизилась от номинальной на 10%. При набросе нагрузки кратковременные провалы величины выходного напряжения достигают 8 и 16% соответственно для $\cos\varphi = 0,9$ и $\cos\varphi = 0,5$; провалы частоты выходного напряжения достигают 10 и 20% для $\cos\varphi = 0,5$ и $\cos\varphi = 0,9$ соответственно.

На рис. 5 приведена кривая, являющаяся результатом работы модели ЗЭР. Точками обозначены дискретные значения $\omega_{\text{опт}}$ в относительных единицах, полученные с помощью КО для соответствующих им значений P в относительных единицах. Сплошной линией показана непрерывная зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$, полученная на основе дискретных значений с помощью АП. При этом значения $\omega_{\text{опт}}$, рассчитанные с помощью АП, отличаются от дискретных значений, определенных КО для соответствующих значений P , на величину, не превышающую 0,03% от номинального значения скорости вращения ω вала дизеля.

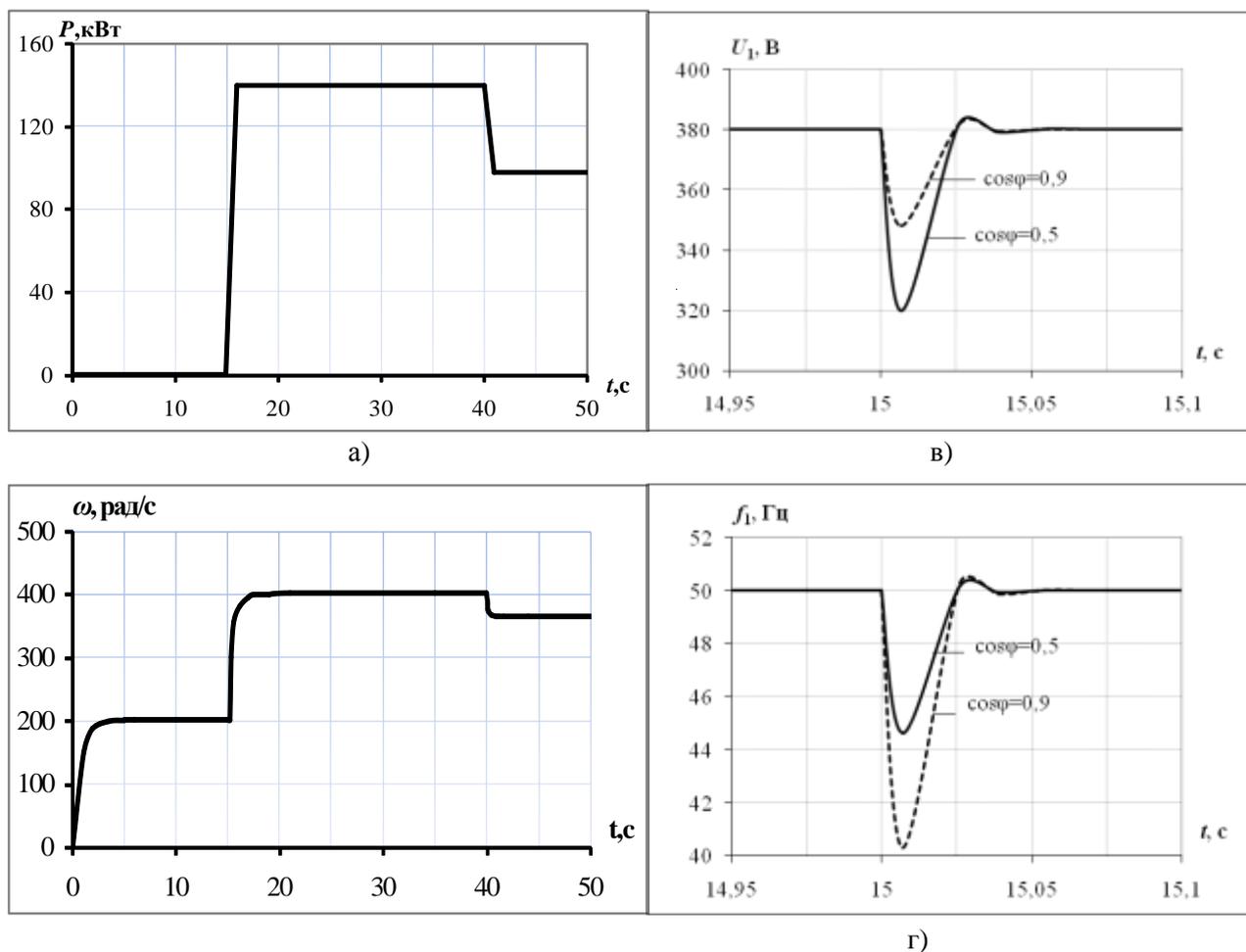


Рис. 4. Результаты моделирования системы Д-Г переменной скорости вращения на базе МДП в пакете Matlab при значениях $\cos\varphi=0,5; 0,9$:

- a* – наброс нагрузки P – 100%, сброс нагрузки P – 30%;
- b* – изменение скорости вращения вала дизеля ω , соответствующее набросу и сбросу нагрузки;
- в, г* – изменение частоты f_1 и напряжения U_1 системы Д-Г в момент наброса нагрузки

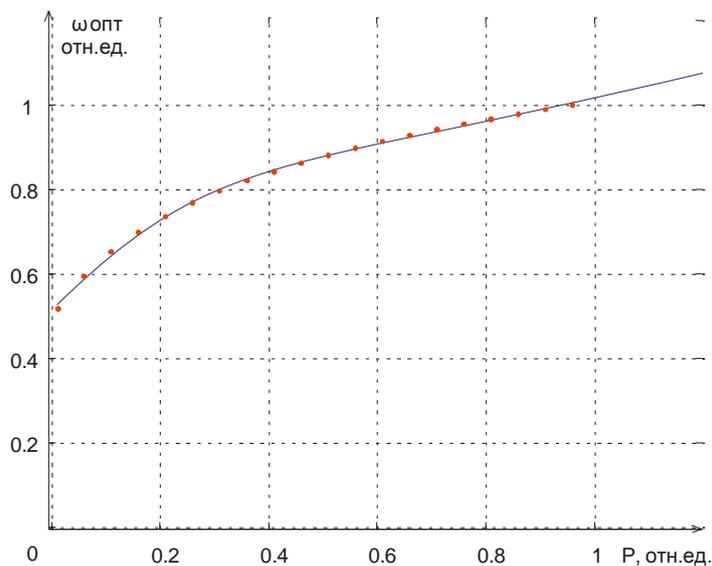


Рис. 5. Результат работы модели ЗЭР

Анализ полученных значений показывает, что наибольшая погрешность работы ЗЭР приходится на граничные точки диапазона обучения. Однако необходимо отметить, что в случае выхода за его пределы значения $\omega_{\text{опт}}$, определяемые ЗЭР в целом согласуются с критериями минимального расхода топлива, не являясь случайными величинами, но погрешность при этом возрастает по мере удаления от границ диапазона обучения и может достигать единиц процента. ЗЭР, модель которого разработана, позволяет уточнять зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ при эксплуатации Д-Г в зависимости от изменения характеристик дизеля в процессе его износа, марки топлива и меняющихся условий работы дизеля. Таким образом, Д-Г с переменной скоростью вращения, оснащенный ЗЭР, можно отнести к классу самообучающихся систем.

Выводы

1. Работа системы Д-Г с переменной скоростью вращения позволит обеспечить экономии топливных ресурсов до 20-30%.
2. Применение в составе электрогенерирующих установок дизелей с переменной скоростью вращения требует нового подхода к управлению топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной управляющей системы, построенной на базе нейронной сети.
3. Разработанные при моделировании Д-Г с переменной скоростью вращения и ЗЭР в Matlab алгоритмы в дальнейшем возможно реализовать на базе современной микропроцессорной техники при создании экспериментального стенда.

Библиографический список

1. **Орлов, А.В.** Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения / А.В. Орлов, В.А. Путятинский, В.В. Сапожников // Судостроение. 1976. № 10. С. 28–29.
2. **Крутов, В.И.** Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
3. Высокоэффективная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения на основе машины двойного питания / О.С. Хватов [и др.] // Приводная техника. 2010. №5. С. 14–19.
4. **Хватов, О.С.** Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Ч. 4. С. 126–131.

Дата поступления
в редакцию 01.02.2011

O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov, I.A. Tarasov, V.V. Pshenichnikov

IMITATION MODEL OF DIESEL ELECTRIC POWER STATION CHARACTERIZED BY ALTERNATING FREQUENCY ROTATION WITH INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF FUEL GIVING

The consideration of the mathematical model, flow and structural sheets of diesel electric power station based on the asynchronous generator with a phase rotor. The description of results of modeling of electric power station in Matlab.

Key words: electric power station, diesel generator, asynchronous generator, converter, economic mode.