

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков¹, О.С. Хватов²**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Волжская государственная академия водного транспорта²

Цель: Разработка сервопривода управления топливоподачей автономных дизель-генераторов переменной частоты вращения, которые могут применяться для электроснабжения удаленных районов и автономных объектов. Актуальность разработки таких сервоприводов определяется тем, что их применение в составе автономных дизель-генераторов позволяет получить существенную экономию топлива и продлить моторесурс электростанций.

Методы исследования: Имитационная модель дизель-генератора переменной скорости вращения с системой управления топливоподачей на основе нейросетевого алгоритма разработана в пакете MATLAB. Для обучения нейронной сети использован метод обратного распространения ошибки.

Результаты: Разработана функциональная схема дизель-генератора переменной скорости вращения на базе синхронного генератора. Разработана функциональная схема и алгоритм работы интеллектуального сервопривода топливного насоса дизель-генераторной установки переменной скорости вращения.

Выводы: Реализация сервопривода управления топливоподачей на основе нейросетевого алгоритма позволяет осуществлять оптимальное управление дизель-генератором при отсутствии многопараметровой характеристики дизеля и при изменяющихся внешних (атмосферное давление, температура и влажность воздуха) и внутренних (степень износа дизеля, марка и качество топлива) условиях его работы.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, синхронный генератор, преобразователь частоты.

Системы «дизель-генератор» (Д-Г) строятся, как правило, на базе синхронных генераторов (СГ). Требование обеспечения стабильной частоты выходного напряжения ($f_1 = \text{const}$) СГ обуславливает необходимость стабилизации частоты вращения (ω) вала дизеля независимо от мощности нагрузки (P). Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива. Оптимального режима работы дизеля можно достигнуть, если с изменением P изменять ω дизеля [1].

Исследования показывают, что уменьшение ω при снижении нагрузки позволяет сократить удельный расход топлива на 20-30%. Одновременное изменение ω и P нагрузки обеспечивает также оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение износа и, следовательно, повышает его моторесурс. Однако при этом должно выполняться требование $f_1 = \text{const}$ при $\omega = \text{var}$.

Построение системы Д-Г с переменной ω возможно на базе преобразователя частоты (ПЧ) (рис.1) [2].

Устройство работает следующим образом. Интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей, представленный блоком 7, получает сигнал с блока вычисления мощности нагрузки 15, который соединен с выходами датчика напряжения 14 и датчика тока 4, измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе преобразователя частоты (ПЧ) 3. В зависимости от значения мощности нагрузки блок 8 задания экономичного режима (ЗЭР), в программу работы которого заложены оптимальные зависимости частоты вращения дизеля I от мощности нагрузки, соответствующие минимальному расходу топлива, формирует сигнал, пропорциональный оптимальной частоте вращения вала дизеля I . Этот сигнал поступает на вход электропривода 9 перемещения рейки топливного насоса, который поддерживает частоту вращения дизеля I на уровне, заданном блоком 8.

Поскольку частота вращения вала дизеля I будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения СГ 2 будут также при этом изменяться. Стабилизация амплитуды переменного напряжения на выходных выводах 6 на

уровне номинального значения для СГ 2 осуществляется с помощью ПЧ 3 и повышающего трансформатора 5.

Стабилизация выходного напряжения ПЧ 3 на заданном уровне осуществляется с помощью блока 12 стабилизации напряжения. Для повышения выходного напряжения на выходных выводах 6 до уровня номинального напряжения СГ 2 на выходе ПЧ 3 установлен повышающий трансформатор 5. Блок 10 возбуждения СГ 2, получающий питание через выводы 11 подключения питания, формирует ток в обмотке возбуждения СГ 2 с учетом сигнала от блока 8 ЗЭР и от датчика напряжения 14.

Частота выходного напряжения на выходных выводах 6 при изменении частоты вращения вала дизеля 1 поддерживается неизменной с помощью ПЧ 3 на уровне, задаваемом блоком 13 задатчика частоты выходного напряжения.

Функциональная схема ЗЭР приведена на рис. 2. ЗЭР состоит из четырех основных элементов: контроллера управления КУ, ассоциативной памяти АП, контроллера обучения КО и энергонезависимой памяти типа Flash, которые объединены общей информационной шиной, допускающей двунаправленный обмен информацией и дальнейшее расширение системы в случае управления несколькими Д-Г.

Важное достоинство нейронных сетей данного типа – способность решать задачу аппроксимации табличной функции многих переменных, дополненная процедурой интерполяции (экстраполяции).

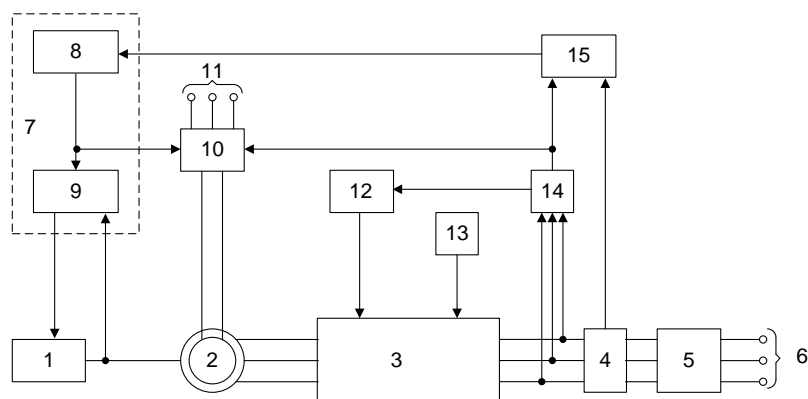


Рис. 1. Функциональная схема системы Д-Г переменной частоты вращения:

1 – дизель; 2 – СГ; 3 – ПЧ; 4 – датчик тока; 5 – повышающий трансформатор; 6 – выходные выводы; 7 – интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей; 8 – ЗЭР; 9 – электропривод перемещения рейки топливного насоса; 10 – блок возбуждения СГ; 11 – выводы подключения питания блока возбуждения СГ; 12 – блок стабилизации напряжения; 13 – задатчик частоты выходного напряжения; 14 – датчик напряжения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки

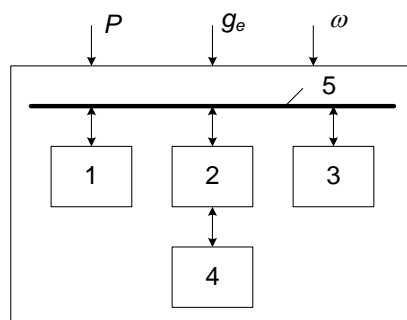


Рис. 2. Функциональная схема ЗЭР:

1 – контроллер обучения (КО); 2 – контроллер управления (КУ); 3 – ассоциативная память (АП); 4 – память данных; 5 – информационная шина

АП модели ЗЭР состоит из трех слоев - входного, скрытого и выходного (рис. 3). Входной слой выполняет нормировку и распределение входных данных. Скрытый слой состоит из двух нейронов, функцией активации которых является гиперболический тангенс. Сигналы нейронов скрытого слоя отображаются в выходной слой линейно. Выходной слой суммирует сигналы скрытого слоя и нормализует их.

В пакете MATLAB разработана имитационная модель ЗЭР, работающая совместно с моделью Д-Г переменной частоты вращения и позволяющая имитировать его работу в статических режимах. Для удобства работы с моделью создан графический интерфейс пользователя. Перед началом имитационного моделирования задается текущее значение мощности нагрузки P в относительных единицах. Результаты расчета представляют собой значение оптимальной частоты вращения $\omega_{\text{опт}}$ и значение удельного расхода топлива g_e .

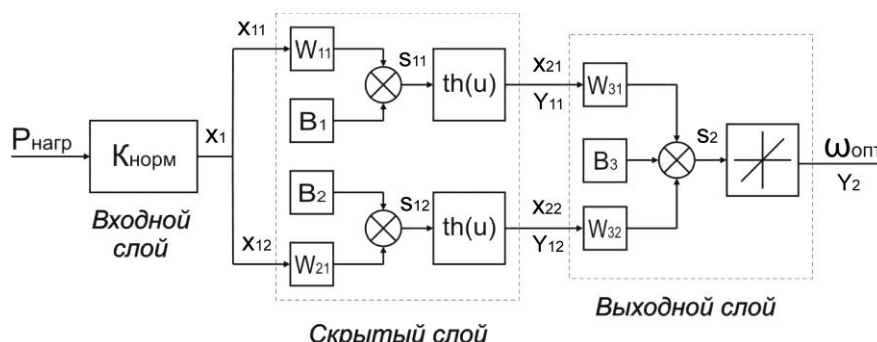


Рис. 3. Структурная схема нейронной сети АП

При расчете значения $\omega_{\text{опт}}$ для текущего значения P в модели АП производится решение следующих уравнений:

$$x_{i1} = P \cdot K_{\text{норм}},$$

$$x_{i2} = th(x_{i1} \cdot W_{i1} + B_i),$$

$$\omega_{\text{опт}} = \left(\sum_{i=1}^n W_{i2} \cdot x_{i2} + B_i \right) \cdot 1 / K_{\text{норм}},$$

где x_{i1} , x_{i2} – соответственно входы i -го нейрона слоев 1 и 2 АП; $K_{\text{норм}}$ – коэффициент нормализации, служащий для приведения значения мощности нагрузки к единичному базису нейронной сети.

Основными параметрами расчета по приведенным ранее формулам являются значения весовых коэффициентов W_{ij} и смещений активационной функции нейрона B_j , определяемых в результате обучения нейронной сети АП.

Обучение нейронной сети АП осуществляется КО (рис. 2), в модель которого заложен алгоритм обратного распространения ошибки, подробно описанный в литературе, посвященной данной тематике [3]. Целью обучения сети в соответствии с данным алгоритмом является такая настройка ее весов, при которой приложение некоторого множества входов приводило бы к требуемому множеству выходов.

На шаге прямого расчета АП осуществляется прямой проход АП от входного слоя к выходному. При этом на входы сети подается входной вектор мощности нагрузки P . Значения выходов рассчитываются по следующим формулам:

$$s_j^{(n)} = \sum_{i=0}^M y_i^{(n-1)} \cdot W_{ij}^{(n)},$$

$$y_j^{(n)} = th(s_j^{(n)}), \omega_q \equiv P_q,$$

где M – число нейронов в слое n ; $y_{i(j-1)}^n$ – выход i нейрона ($j-1$) слоя n ; x_{ij}^n – вход i нейрона (j) слоя n ; P_q – компонента q входного вектора P ; ω_q – компонента q выходного массива скоростей ω .

Для выходного слоя и скрытого слоя n (рис. 4) рассчитывается величина ошибки δ :

$$\delta_j^{(n)} = (y_j^{(n)} - d_j) \frac{\partial y_j}{\partial s_j},$$

где d_j – идеальное (желаемое состояние нейрона).

Также для выходного слоя n рассчитываются изменения весов:

$$\Delta W_{ij}^{(n)} = -\beta \cdot \delta_j^{(n)} y_i^{(n-1)},$$

где β – коэффициент обучения, выбираемый меньше единицы, для придания «инерционности» процессу обучения.

Расчет повторяется до тех пор, пока ошибка работы сети АП E_ω не станет меньше допустимой.

Алгоритм обратного распространения ошибки использует разновидность градиентного спуска, т.е. осуществляет спуск вниз по поверхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму ошибки. Однако в процессе обучения сеть может попасть в локальный минимум. В точке локального минимума все направления градиента ведут вверх, и сеть неспособна из него «выйти». На этот случай в разработанном авторами алгоритме обучения предусмотрено смещение одного из текущих значений весовых коэффициентов W_{ij} на некоторую случайную величину. Если повторение данной процедуры несколько раз приведет алгоритм в одно и то же состояние, то можно с уверенностью считать, что найден глобальный минимум и процесс обучения может быть завершен. На рис. 4 приведены кривые изменения функции ошибки E_ω , весовых коэффициентов W_{ij} и смещений B_j в зависимости от количества эпох обучения n . На рис. 4 пунктирной линией показан момент достижения допустимой величины ошибки. Необходимым условием для корректного обучения нейронной сети АП является наличие «обучающего множества» – множества логических пар $\omega_{\text{опт}} = f(P)$, полнота и точность значений которого, в конечном итоге, определяет точность и скорость работы ЗЭР в целом. Табличный массив значений $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ для дискретных значений P хранится в памяти данных ЗЭР (рис. 2). Алгоритм формирования этого массива авторами подробно описан в [4].

На рис. 5 приведена кривая, полученная в результате работы модели ЗЭР совместно с моделью Д-Г типа SDMO DIESEL 4000 E XL (мощность - 4 кВт, номинальная частота вращения - 1500 об/мин). При этом система управления топливоподачей Д-Г формирует задание на изменение частоты вращения дизеля с периодом не менее 0.5 с, чтобы скачки напряжения на выходе ПЧ не превышали 5%. Моделирование проводилось для относительных значений мощностей нагрузки в диапазоне от 0.00 до 1.00 с шагом 0.05. Точками обозначены дискретные значения, рассчитанные с помощью КО. 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 частоты вращения ω вала дизеля.

Анализ полученных значений показывает, что наибольшая погрешность работы АП приходится на граничные точки диапазона обучения. В случае выхода за его пределы значения $\omega_{\text{опт}}$, определяемые АП, в целом согласуются с критериями минимального расхода, не являясь случайными величинами.

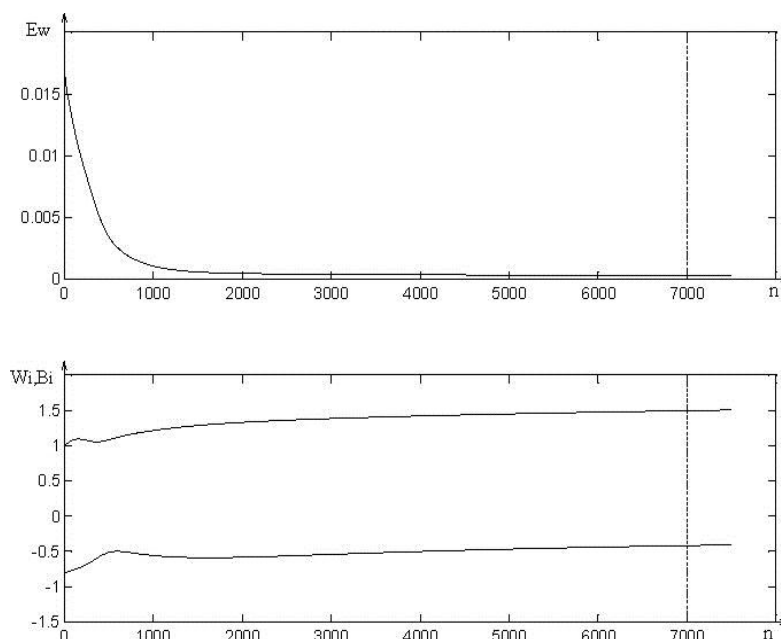


Рис. 4. Зависимости ошибки E_w , весовых коэффициентов W_{ij} и смещений B_j в функции количества эпох обучения n

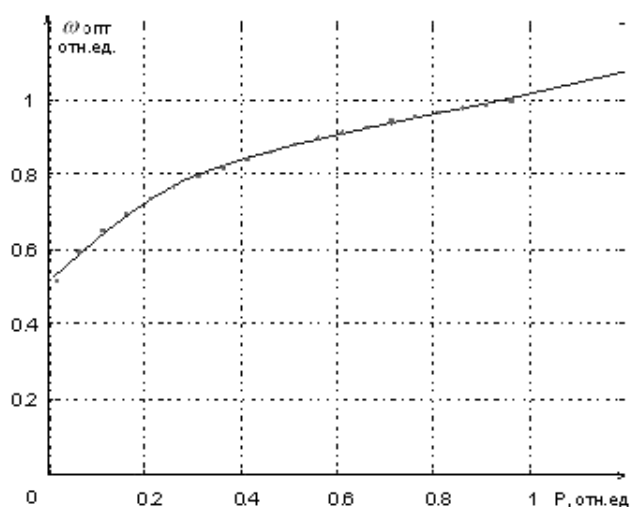


Рис. 5. Результат работы модели ЗЭР совместно с Д-Г

Погрешность при этом возрастает по мере удаления от границ диапазона обучения и может достигать единиц процента.

Разработанные при моделировании в Matlab алгоритмы реализуются на базе современной микропроцессорной техники при создании авторами экспериментального образца Д-Г переменной скорости вращения.

Библиографический список

1. **Хватов, О.С.** Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник ИГЭУ. 2010. Вып. 2. С. 53–56.
2. **Пат.** 2412513 Российская Федерация МПК Н 02 J 3/34. Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5.

3. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Изд-во «Вильямс», 2001. – 287 с.
4. **Хватов, О.С.** Модель задатчика экономичного режима работы дизель-генераторной установки с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Актуальные проблемы электроэнергетики: мат-лы XXX научно-техн. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 65–70.

*Дата поступления
в редакцию 10.12.2013*

A.B. Daryenkov¹, O.S. Khvatov²

CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS DIESEL GENERATOR CHARACTERIZED BY ALTERNATING FREQUENCY ROTATION OF SHAFT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Volga state academy of wafer transport², Nizhny Novgorod

Purpose: Servo-driver of control of the fuel pump of autonomous diesel generator characterized by alternating frequency rotation of shaft, which can be applied to power supply of remote areas and autonomous objects. The urgency of the engineering of such servo-driver is defined by means of the fact, that their application as a part of autonomous diesel generator allows to receive essential economy of fuel and to prolong motor potential of electric power station.

Design/methodology/approach: The imitating model of the diesel generator characterized by alternating frequency rotation of shaft with a control system of fuel feeding on the basis of neuronetwork algorithm is developed in a MATLAB. For training of a neural network the method of the return distribution of a mistake is used.

Findings: The engineering of the flow sheets of diesel generator based on a synchro generator and characterized by alternating frequency rotation of shaft. The engineering of the flow sheet and algorithm of operation for intellectual servo-driver of control of the fuel pump of autonomous electric power station characterized by the lowered fuel consumption.

Originality/value: Servo-driver realization controls of fuel feeding on the basis of neuronetwork algorithm allows to exercise optimum control of the diesel generator in the absence of the multiparameter characteristic of the diesel and at changing external (atmospheric pressure, temperature and humidity of air) and internal (degree of wear of the diesel, brand and quality of fuel) conditions of its work.

Key words: electric power station, diesel generator, synchrogenerator, converter.