

## Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима

Дарьенков А. Б., канд. техн. наук

ФГБОУ «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»

Хватов О. С., доктор техн. наук

ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», Нижний Новгород

Приведено описание функциональной схемы единой электростанции судна на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной частотой вращения. Дана оценка топливной экономичности таких электростанций.

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

Для энергообеспечения районов России с децентрализованным энергоснабжением используется около 49,5 тыс. установок «дизель-генератор» (Д-Г) суммарной мощностью 17 млн кВт, вырабатывающих ежегодно около 50 млрд кВт·ч в год электроэнергии и расходующих при этом примерно 6 млн т условного топлива [1–4]. Системы 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  $\omega$  вала дизеля независимо от мощности нагрузки  $P$ . Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива. Оптимального режима работы дизеля можно достичь, если с изменением  $P$  будет изменяться  $\omega$  [5, 6].

Результаты исследований показывают, что уменьшение частоты вращения вала при снижении нагрузки позволяет сократить удельный расход топлива  $g_e$  на 20–30% [7, 8]. При одновременном изменении  $\omega$  и  $P$  обеспечивается также оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижается его износ и, следовательно, повышается моторесурс. Однако при этом должно выполняться требование  $f_1 = \text{const}$  при  $\omega = \text{var}$ .

Построение системы Д-Г с переменной  $\omega$  (рис. 1) возможно на базе преобразователя частоты (ПЧ) [9]. Интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей  $I_3$  в зависимости от мощности нагрузки электростанции задает оптимальную частоту вращения вала дизеля  $I_1$ . Соответственно будут изменяться амплитуда и частота переменного напряжения СГ 2. Их стабилизация на выходных зажимах  $\mathcal{G}$  на уровне номинальных

значений для СГ 2 осуществляется с помощью ПЧ 6 и повышающего трансформатора 8.

Одна из важнейших задач при создании автономной электростанции на базе системы Д-Г с переменной частотой вращения — разработка задатчика экономичного режима (ЗЭР), который в зависимости от мощности нагрузки должен формировать на своем выходе оптимальные (в части потребления топлива) значения частоты вращения вала дизеля. Эти значения могут быть определены по многопараметрической характеристике дизеля, которая, однако, у каждого конкретного дизеля индивидуальна. Несмотря на то, что характеристики двух дизелей даже одного типа и мощности всегда различны, производители этих агрегатов, как правило, их не предоставляют. Рассчитать многопараметрическую характеристику невозможно — ее получают только экспериментальным путем. Кроме того, она изменяется в зависимости от условий внешней среды, степени износа дизеля и качества топлива. Поэтому актуальна разработка такой структуры ЗЭР, которая при отсутствии многопараметрической характеристики позволяла бы автоматически вычислять значение оптимальной частоты вращения для текущего значения мощности нагрузки в данный момент времени при изменяющихся внешних и внутренних условиях работы дизеля. Следовательно, ЗЭР должен быть самообучающейся системой. Ее построение наиболее целесообразно проводить на основе систем искусственного интеллекта (нейросетевой логики).

На рис. 2 приведена функциональная схема разработанного авторами ЗЭР, состоящего из четырех основных элементов: контроллера

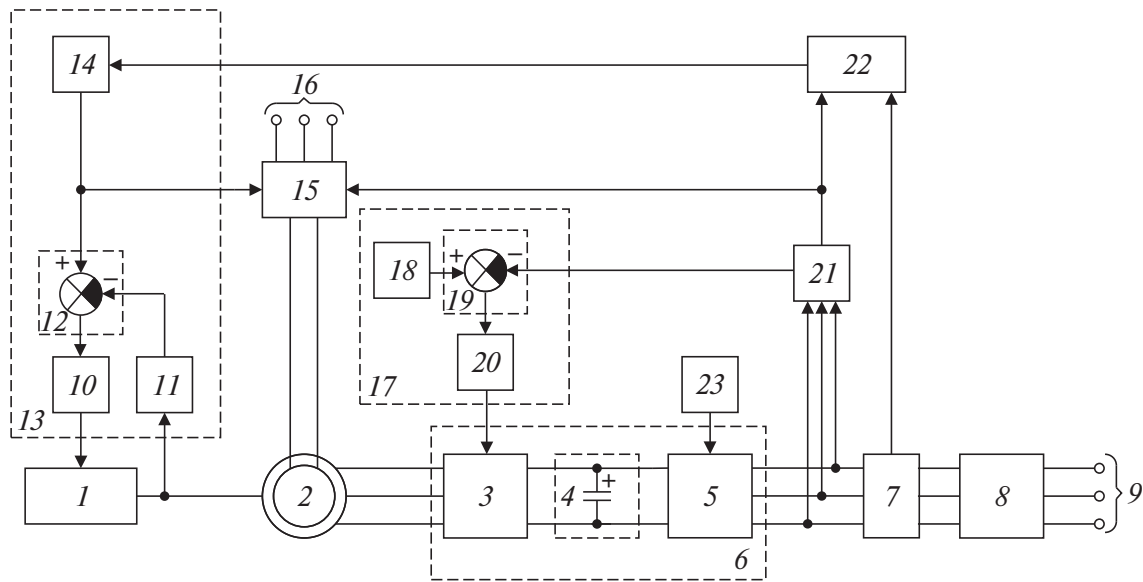


Рис. 1. Функциональная схема системы Д-Г переменной частоты вращения:

1 — дизель; 2 — СГ; 3 — управляемый выпрямитель; 4 — конденсаторная батарея; 5 — инвертор напряжения; 6 — ПЧ; 7 — датчик тока; 8 — повышающий трансформатор; 9 — выходные выводы; 10 — исполнительный электродвигатель; 11 — датчик частоты вращения вала дизеля; 12, 19 — сумматоры; 13 — интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей; 14 — ЗЭР; 15 — блок возбуждения СГ; 16 — выводы подключения питания блока возбуждения СГ; 17 — блок стабилизации напряжения; 18 — задатчик напряжения; 20 — регулятор напряжения; 21 — датчик напряжения; 22 — блок вычисления мощности нагрузки; 23 — задатчик частоты выходного напряжения

обучения (КО) 1, контроллера управления (КУ) 2, ассоциативной памяти (АП) 3 и энергонезависимой памяти типа Flash 4. Все они объединены общей информационной шиной 5, допускающей двунаправленный обмен информацией и дальнейшее расширение системы в случае управления несколькими Д-Г. Для построения АП ЗЭР наиболее целесообразным представляется использование радиально-базисных нейронных сетей (RBFN — radial basis function network). Важное достоинство таких сетей — способность решать задачу аппроксимации табличной функции многих переменных, дополняя ее процедурой интерполяции (экстраполяции).

Математически нейрон представляет собой взвешенный сумматор, выход которого определяется через его входы и матрицу весов следующим образом:

$$y = f(u),$$

где  $u = \sum_{j=1}^n W_{ij}x_{ij} + B_jx_j$ ;  $x_{ij}$  и  $W_{ij}$  — сигнал на  $i$ -м входе  $j$ -го нейрона и соответствующий ему весовой коэффициент;  $f(u)$  — активационная функция.

Дополнительный вход  $B_j$  и соответствующий ему вес используются для инициализации  $j$ -го нейрона — смещения его активационной функции по горизонтальной оси, т. е.

для формирования порога чувствительности нейрона.

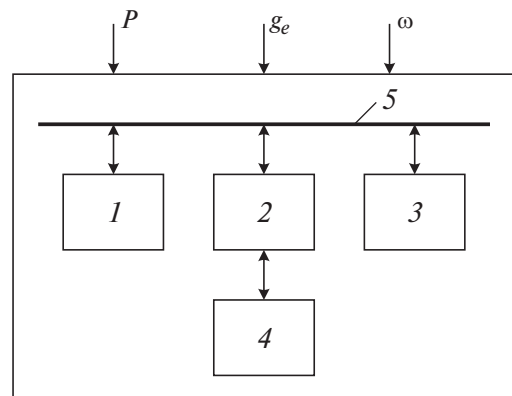


Рис. 2. Функциональная схема ЗЭР:

1 — КО; 2 — КУ; 3 — АП; 4 — память данных Flash; 5 — информационная шина

для формирования порога чувствительности нейрона.

Ассоциативная память модели ЗЭР состоит из трех слоев — входного, скрытого и выходного (рис. 3). Во входном слое нормируются и распределяются входные данные. Скрытый слой содержит два нейрона, функцией активации которых является гиперболический тангенс. Сигналы нейронов этого слоя линейно отображаются в выходном слое, где они суммируются и нормализуются.

При расчете “идеального” (оптимального) значения выхода КО  $\omega_{\text{опт}}$  для текущего зна-

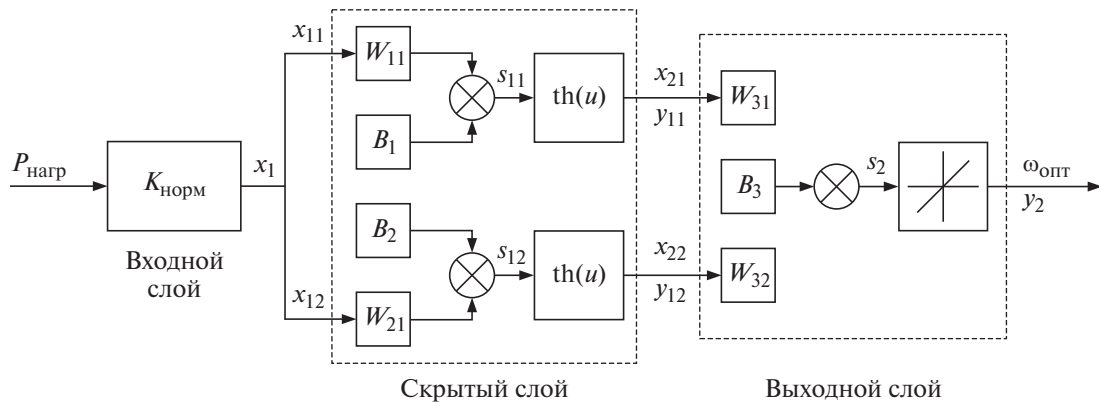


Рис. 3. Структурная схема нейронной сети АП

чения  $P$  в модели АП решаются следующие уравнения:

$$x_{i1} = PK_{\text{норм}};$$

$$x_{i2} = \text{th}(x_{i1}W_{i1} + B_i);$$

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

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

Основными параметрами при расчете по приведенным формулам являются значения весовых коэффициентов  $W_{ij}$  и смещений активационной функции нейрона  $B_j$ , определяемых в результате обучения нейронной сети АП. Обучение осуществляется с помощью КО (см. рис. 2), в модель которого заложен алгоритм обратного распространения ошибки, подробно описанный в [10]. Цель обучения сети в соответствии с данным алгоритмом — такая настройка ее весов, при которой приложение некоторого множества входов приводило бы к требуемому множеству выходов.

На шаге прямого расчета АП выполняется прямой ее проход от входного слоя к выходному. При этом на входы сети подается входной вектор мощности нагрузки  $P$ , а значения на выходах рассчитываются по следующим формулам:

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

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

где  $M$  — число нейронов в слое  $n$ ;  $y_i^n$  — выход  $i$ -го нейрона слоя  $n$ ;  $P_q$  — компонента  $q$  входного вектора  $P$ ;  $\omega_q$  — компонента  $q$  выходного массива скоростей  $\omega$ .

Для выходного и скрытого слоев  $n$  определяется ошибка

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

где  $d_j$  — “идеальное” (желаемое) состояние нейрона.

Для выходного слоя  $n$  вычисляются также изменения весов:

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

где  $\beta$  — коэффициент обучения (выбирается меньше единицы для придания “инерционности” этому процессу).

Затем проводится коррекция значений весов связей по формуле

$$W_{ij}^{(n)}(t) = W_{ij}^{(n-1)}(t-1) + \Delta W_{ij}^{(n)}(t),$$

где  $t$  — номер эпохи обучения АП.

Расчет повторяется до тех пор, пока ошибка работы сети АП, определяемая по формуле

$$E_{\omega} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^p (\omega_t - \omega_{\text{опт}})^2$$

(где  $\omega_t$  — “реальное” значение выхода АП на эпохе  $t$ ;  $p$  — номер эпохи обучения, соответствующей допустимой ошибке), не станет меньше допустимой.

В алгоритме обратного распространения используется разновидность градиентного спуска, т. е. осуществляется спуск вниз по поверхности ошибки при непрерывном под-

страивании веса в направлении к ее минимуму. Однако в процессе обучения сеть может попасть в локальный минимум, в точке которого все направления градиента ведут вверх, и сеть неспособна “выйти” из него. Для такого случая в алгоритме обучения предусмотрено смещение одного из текущих значений весовых коэффициентов  $W_{ij}$  на некоторую случайную величину. Если неоднократное повторение данной процедуры приводит к одному и тому же состоянию алгоритма, это означает, что найден глобальный минимум, и процесс обучения можно завершить.

Проведено моделирование работы модели ЗЭР совместно с моделью Д-Г мощностью 4 кВт [11] для относительных значений мощностей нагрузки в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,05. При этом значения  $\omega_{\text{опт}}$ , рассчитанные с помощью АП, отличались от дискретных значений, определенных КО для соответствующих значений  $P$ , не более чем на 0,03 % от номинального значения частоты вращения  $\omega$  вала дизеля.

Анализ результатов моделирования показал, что наибольшая погрешность функционирования АП, а значит, и ЗЭР 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. При этом погрешность, возрастающая по мере удаления от границ диапазона обучения, может достигать нескольких процентов.

Разработанные при моделировании в программе Matlab алгоритмы реализованы на базе современной микропроцессорной техники при создании авторами экспериментального образца Д-Г с переменной частотой вращения.

### Список литературы

1. **Онищенко Г. Б., Лазарев Г. Б.** Развитие энергетики России. Направления инновационно-технологического развития. — М.: Россельхозакадемия, 2008.
2. **Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. — М.: КНОРУС, 2010.
3. **Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов и др.** — СПб.: Наука, 2002.
4. **Автоматизированная система управления узлом нагрузки в рамках концепции построения интеллектуальных электрических сетей / А. Б. Лоскутов, А. И. Чивенков, А. П. Антропов, С. А. Суяков.** — Промышленная энергетика, 2012, № 5.
5. **Орлов А. В., Путятинский В. А., Сапожников В. В.** Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения. — Судостроение, 1976, № 10.
6. **Крутов В. И.** Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1979.
7. **Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Тарасов И. М.** Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала. — Вестник Ивановского гос. техн. ун-та, 2010, вып. 2.
8. **Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С.** Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения. — В кн.: Сб. науч. статей “Эксплуатация морского транспорта”. — СПб.: ГМА им. адмирала С. О. Макарова, 2013, № 1.
9. **Пат. 2412513 РФ.** Автономная электростанция переменного тока / А. Б. Дарьенков, О. С. Хватов. — Оpubл. в бюл., 2011, № 5.
10. **Каллан Р.** Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2001.
11. **Имитационная модель дизель-генераторной электростанции с переменной скоростью вращения на базе синхронного генератора / О. С. Хватов, А. Б. Дарьенков, И. С. Поляков, В. В. Пшеничников.** — В кн.: Сб. науч. статей “Эксплуатация морского транспорта”. — СПб.: ГМА им. адмирала С. О. Макарова, 2012.

fae@nntu.nnov.ru