

УДК 621.316.79

**А.Б. Дарьенков, Д.А. Бадугин, Е.В. Бычков, В.Л. Мельников,  
В.В. Соколов, Е.О. Смирнов, Д.А. Комраков**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ГИБРИДНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен принцип регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при изменении мощности нагрузки. Приведено описание функциональной схемы нейросетевого задатчика экономичного режима и основных принципов его работы.

*Ключевые слова:* ветрогенератор, дизель-генератор, электростанция, задатчик экономичного режима, искусственные нейронные сети.

Одним из приоритетных направлений развития науки в сфере электроэнергетики в Российской Федерации является использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения. А это требует обеспечения максимального КПД работы генерирующих установок и повышения экономии затрат энергии.

Одним из наиболее динамично развивающихся в мире видов возобновляемой энергетики выступает ветроэнергетика. С географической и метеорологической точек зрения не вся территория РФ является благоприятной для эффективного (крупномасштабного) использования ветроэнергетики. В природной зоне центральной России в условиях существенной нестабильности ветровых процессов затруднительно поддерживать номинальные параметры работы возобновляемых энергетических установок [1]. Поэтому более целесообразным представляется использование гибридных установок, которые содержат наряду с возобновляемыми компонентами модули, работающие на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и устройства сопряжения с сетью.

Такие установки, как правило, имеют в своем составе мачту с лопастями, синхронный генератор, питающий нагрузку через инвертор, параллельно заряжая аккумуляторную батарею (АКБ) излишками генерируемой энергии.

Если при увеличении нагрузки или при уменьшении скорости ветра ветрогенератор не сможет обеспечить требуемых параметров, в работу вводится дизель-генераторная установка (ДГУ).

Как правило, ДГУ строятся на основе синхронных генераторов. При изменении мощности нагрузки  $P$  и других параметров шины постоянного тока необходимо стабилизировать частоту вращения вала дизеля  $\omega$  для стабилизации и удержания частоты выходного напряжения на постоянном уровне. Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива [2]. Оптимального режима работы дизеля можно достигнуть, если с изменением мощности нагрузки изменять частоту вращения вала дизеля, поддерживая постоянную величину частоты выходного напряжения. Исследования показывают, что уменьшение частоты вращения вала дизеля при снижении нагрузки позволяет сократить удельный расход топлива на 20-30% [2]. Одновременное изменение частоты вращения и мощности нагрузки обеспечивает также оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение износа и, следовательно, повышает его моторесурс.

Для регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при снижении мощности нагрузки используется задатчик экономичного режима (ЗЭР) – адаптивный контроллер, в основу алгоритма которого заложена концепция нейронных сетей [3].

На рис. 1 представлена модель системы управления ветродизель-генераторной элек-

тростанцией (ВДЭС) на основе ЗЭР, задачей которого является формирование сигнала управления ВДЭС во всем диапазоне состояний устойчивой работы системы. При этом изменение состояний системы должно проходить по оптимальной траектории расхода топлива согласно многопараметровой характеристике эффективного расхода топлива ДВС, приведенной на рис. 2.

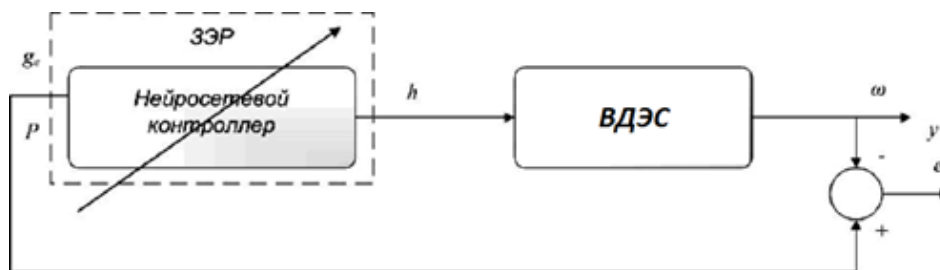


Рис. 1. Модель системы управления ВДЭС на основе нейросетевого контроллера с прямым управлением ЗЭР

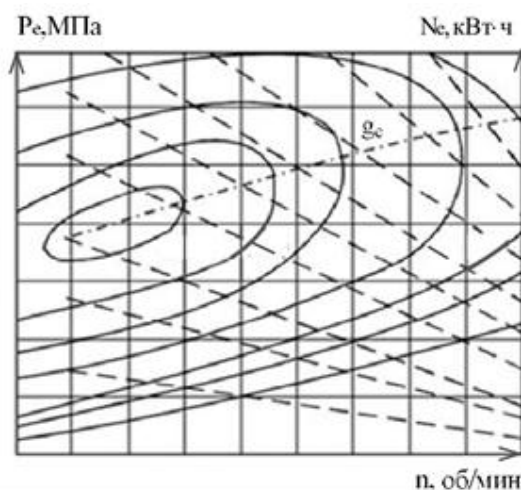


Рис. 2. Многопараметровая характеристика ДВС

Известной основой для реализации адаптивного нейросетевого контроллера является искусственная нейронная сеть (ИНС) [4].

Важнейшее свойство ИНС состоит в параллельной обработке информации одновременно всеми узлами (нейронами). Благодаря этой особенности, при большом количестве межнейронных связей достигается значительное ускорение обработки информации. Во многих ситуациях становится возможна обработка информации в реальном масштабе времени.

Другое преимущество ИНС состоит в способности к обучению и обобщению полученных знаний, т.е. адаптации к изменяющимся условиям как самой системы, так и характеристик внешней среды, не заложенных в систему в явном виде. Натренированная на ограниченном количестве обучающих выборок сеть обобщает накопленную информацию и вырабатывает ожидаемую реакцию применительно к данным, не обрабатывавшимся в процессе обучения.

Логической единицей для обработки входных переменных в ИНС является модель искусственного нейрона. На рис. 3 приведена обобщенная модель базового вычислительного узла системы, нейрона, лежащего в основе таких сетей.

В модели искусственного нейрона множество входных сигналов, обозначенных  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , поступает на вход. Эти входные сигналы в совокупности обозначены вектором  $X$ . Каждый сигнал умножается на соответствующее значение весовой функции или вес  $W_1, W_2, \dots, W_N$  и поступает на суммирующий блок, обозначенный  $\Sigma$ . Множество весов функций в совокупности

обозначается вектором  $W$ . Суммирующий блок алгебраически суммирует взвешенные, согласно значениям весовых функций, входы, и на его выходе формируется скалярное значение  $y$ . Сигнал  $y$  поступает на вход функции активации, определяя сигнал возбуждения или торможения нейрона на выходе [5]. Этот сигнал поступает на синапсы следующих нейронов и т.д.

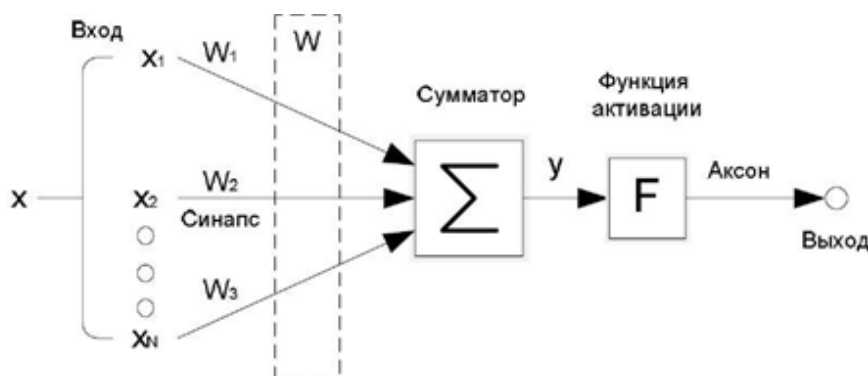


Рис. 3. Модель искусственного нейрона

Для вычисления кривой оптимального расхода топлива в схему поступают сигналы мощности канала ДВС и ветроканала, а также среднее значение расхода топлива в единицу времени. На их основании вычисляется величина оптимального удельного расхода топлива, отнесенная к единице выходной мощности. В результате работы нейросетевого контроллера (ЗЭР), на выходе системы вырабатывается управляющее воздействие на рейку топливного насоса, соответствующее минимальному расходу топлива для требуемой мощности на нагрузке.

Структурная схема нейросетевого контроллера (ЗЭР) представлена на рис. 4. ЗЭР реализует функции контроллера обучения и управления (КОиУ) и блока сопряжения и сбора данных (БСиСД). КОиУ представляет собой микропроцессорное устройство (высокопроизводительный микроконтроллер), реализующий нейросетевой интерфейс системы управления. КОиУ располагается на плате БСиСД [6].

БСиСД служит буфером для согласования логических и аналоговых входных сигналов датчиков тока, напряжения и расхода топлива, а также формирует входные сигналы для блока управления шаговым электроприводом рейки топливного насоса ДВС. Электрические цепи БСиСД обеспечивают гальваническую развязку входных и выходных сигналов микропроцессорной системы. Также на плате присутствует интерфейсный полудуплексный преобразователь последовательной шины UART-RS485 с гальванически развязанными каналами передачи данных и питания, обеспечивающий интерфейс отладки алгоритма работы микропроцессорной системы.

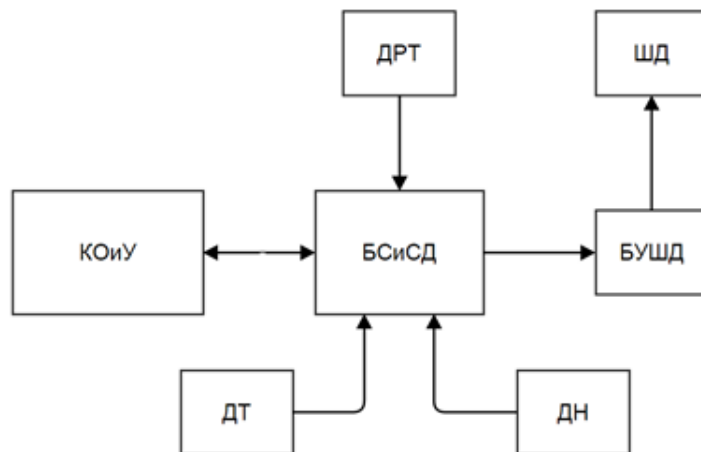


Рис. 4. Функциональная схема ЗЭР

Функциональная схема контроллера обучения и управления (КОиУ) приведена на рис. 5. Представленная схема состоит из следующих структурных элементов: контроллера управления (КУ), контроллера обучения (КО), ассоциативной памяти (АП) и памяти данных (ПД).

Контроллер управления (КУ) осуществляет общее управление системой топливоподачи. Отслеживая изменение мощности нагрузки, он вырабатывает управляющее воздействие на рейку топливного насоса на основе действующих значений мощности формируемых ветрогенератором и дизель-генератором.

Блок АП представляет собой программную модель искусственной нейронной сети. С ее помощью решается задача аппроксимации табличной функции для заданных входных параметров с целью оптимизации работы системы в текущий момент времени.

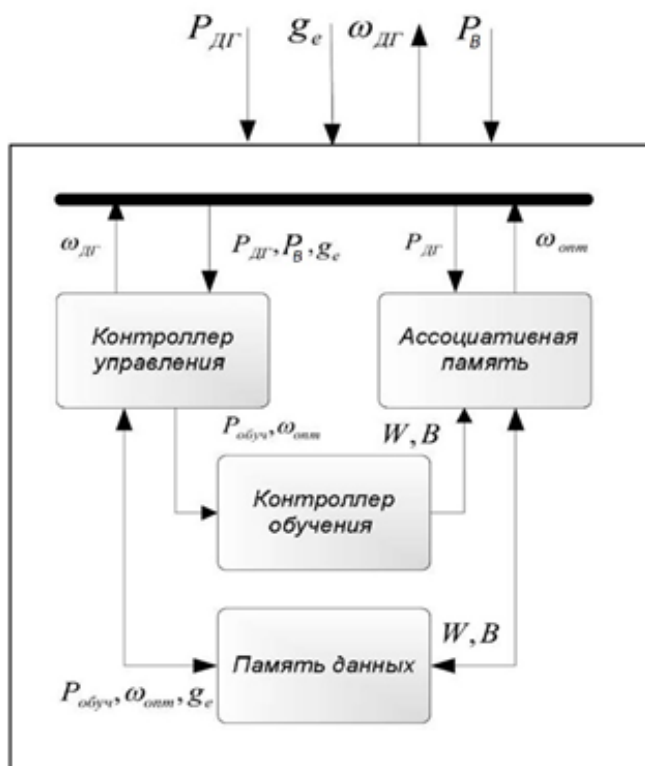


Рис. 5. Функциональная схема КОиУ

Для корректной работы АП предусмотрен КО. Данный блок производит обучение АП по алгоритму одного из известных способов обучения нейронных сетей. Массив логических зависимостей, составляющих обучающее множество, определяется КУ в процессе работы ЗЭР [3].

Принцип работы ЗЭР на основе АП поясняется блок-схемой, приведенной на рис. 6. КУ отслеживает значения мощности нагрузки и в случае ее изменения более чем на некоторую предустановленную величину  $P_{шаг}$ , фиксируется новое значение  $P_{уст}$ . Для оценки необходимости регулирования используется интегральное значение  $P_{уст}$ , что позволяет исключить отработку ЗЭР импульсных изменений потребляемой мощности от дизель-генератора.

Далее КУ устанавливает принадлежность нового значения мощности к диапазону значений, уже запомненных в АП – диапазону обучения ЗЭР, в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 7 [4].

Массив значений  $P_{обуч}$ , накапливаемый в процессе эксплуатации дизель-генератора, хранится в ПЗУ ЗЭР. Он представляет собой табличную функцию  $\omega_{опт}=f(P_{обуч})$ , значения в которой определены с некоторым шагом  $P_{шаг}$ . Величина  $P_{шаг}$  - шаг обучения нейронной сети, физически представляет область, в которой нейронная сеть «предсказывает» поведение функции  $\omega_{опт}=f(P)$  с достаточной точностью.

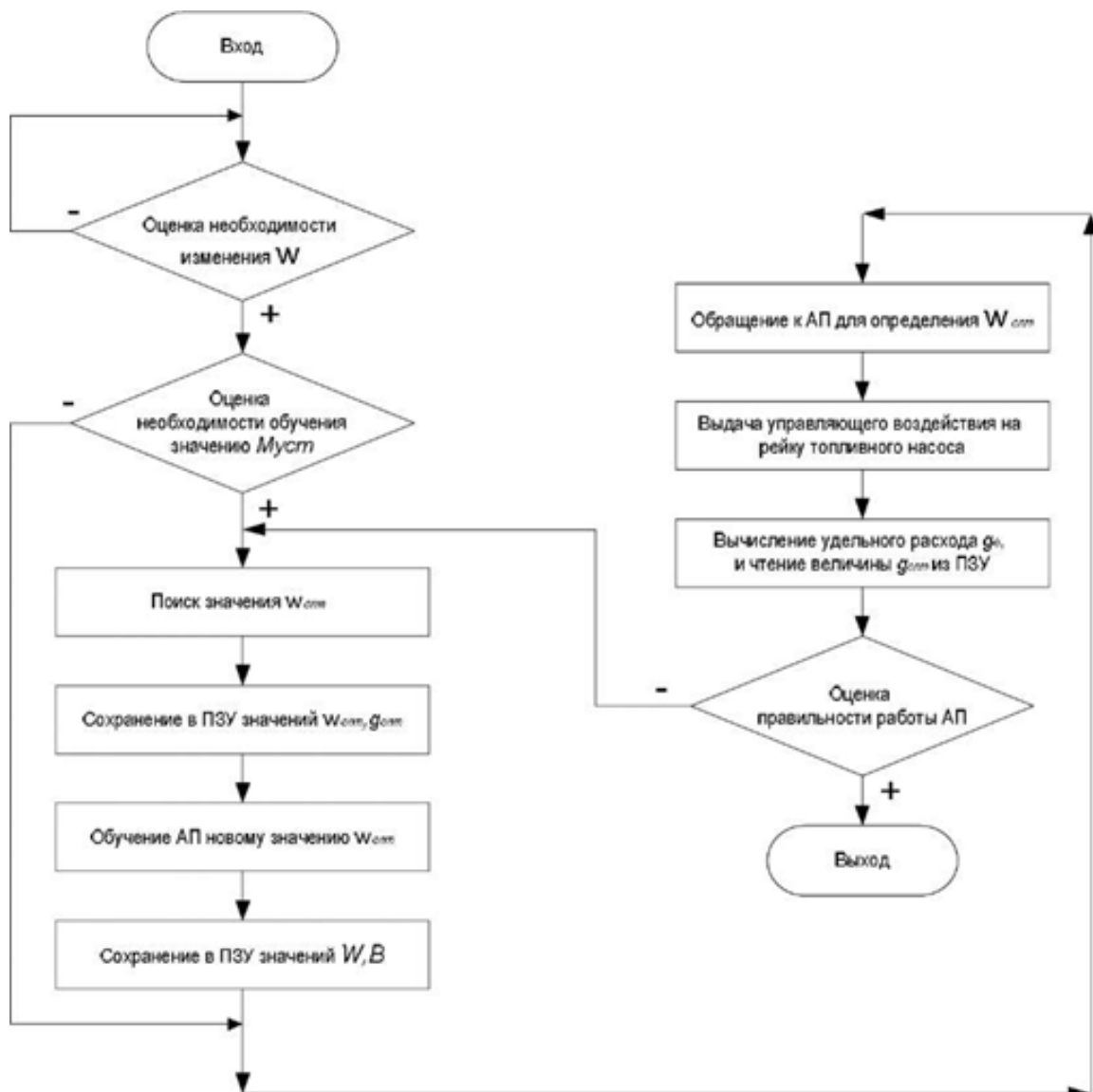
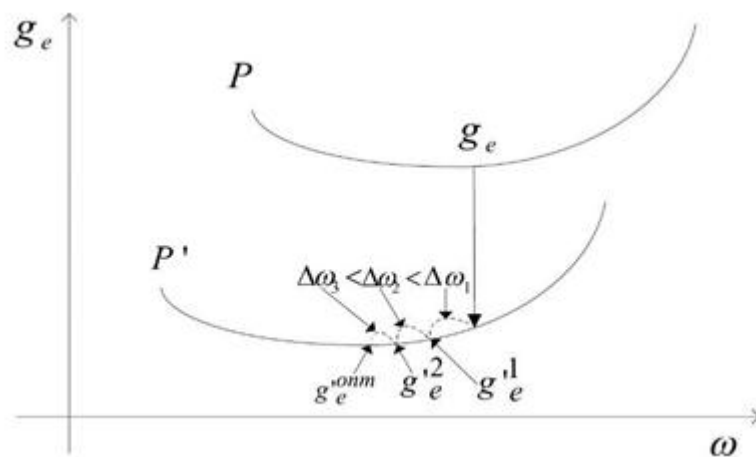


Рис. 6. Алгоритм работы ЗЭР

Процесс определения  $\omega_{opt}$  заключается в определении минимума функции расхода топлива  $g_e = f(\omega)$  для конкретного значения  $P$  и поясняется рис. 7.

Рис. 7. Алгоритм определения значения  $\omega_{opt}$

При изменении мощности нагрузки с  $P$  на  $P'$  дизель-генератор переходит на новую кривую расхода топлива (рис. 8). Реакцией на это со стороны КО является изменение задания частоты вращения на некоторую величину  $\Delta\omega_1$ . При этом вычисляется производная изменения величины удельного расхода топлива. По знаку определяется, в каком направлении далее необходимо изменять частоту вращения - в сторону увеличения или в сторону уменьшения.

На следующем шаге происходит изменение на величину  $\Delta\omega_2$ , которая меньше на величину, пропорциональную коэффициенту  $K$ , определяющему скорость поиска минимума функции. Критерием окончания поиска  $\omega_{\text{опт}}$  является уменьшение значения производной ниже допустимой ошибки  $\varepsilon$ .

Для синтеза оптимальных алгоритмов работы ЗЭР, а также изучения и оценки особенностей взаимодействия между разными автономными генерирующими установками авторами был разработан испытательный стенд, содержащий ветрогенератор, дизель-генератор и их имитаторы, выполненные на базе асинхронных двигателей, питаемых от преобразователей частоты. Такое исполнение позволяет имитировать скорость ветра, скорость вращения вала дизеля, производить наладку управляющего алгоритма в программируемом логическом контроллере и обучать ЗЭР.

#### Библиографический список

1. **Васенин, А.Б.** Имитационная модель автономной ветро-дизельэнергетической установки / А.Б. Васенин, А.В. Серебряков, В.Г. Титов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения): Труды МНТК. – Иваново, ИГЭУ, 2011. Т. 2.
2. **Хватов, О.С.** Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.
3. **Хватов, О.С.** Нейросетевой алгоритм системы управления топливоподачей дизель-генератора переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. Вып. 3.
4. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
5. **Круглов, В.В.** Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 221 с.
6. **Дарьенков, А.Б.** Применение принципов нейронных сетей для управления ветро-дизельной электростанцией на базе ДВС переменной скорости вращения / А.Б. Дарьенков, Д.А. Комраков, Е.Н. Соснина // Материалы XIV Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2015. С. 95.

*Дата поступления  
в редакцию 02.06.2015*

**A. B. Dar'enkov, D. A. Badugin, E. V. Bychkov, V. L. Mel'nikov,  
V. V. Sokolov, E. O. Smirnov, D. A. Komrakov**

#### **RESEARCH OF CONTROL SYSTEM OF FREQUENCY OF ROTATION OF THE SHAFT DIESEL GENERATOR HYBRID WIND FARM**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

The principle of regulation of frequency of rotation of the shaft of the diesel generator when the power load. The description of the neural network adjuster economic mode functional scheme and the basic principles of its work.

*Key words:* wind power generator, diesel generator, electric power station, neural network adjuster economic mode, artificial neural network.