

УДК 621.3.016.31

Д.Н. Лапаев, Д.С. Мочалин, В.Г. Титов

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА  
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Начиная с 2000 г. в ОАО «Газпром» вопросы энергоэффективности и энергосбережения являются приоритетным направлением деятельности, и представляют собой комплекс программных мер, направленных на рациональное использование и экономию расхода топливно-энергетических ресурсов.

Прогнозирование и планирование электропотребления на компрессорной станции является неотъемлемой частью экономии потребления топливно-энергетических ресурсов. Основными потребителями электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами являются электродвигатели с короткозамкнутым ротором аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа.

Поиск наилучшей регрессионной модели представляет собой довольно громоздкий процесс. Используются нейронных сетей, которые обладают рядом преимуществ перед регрессионными моделями: сами подбирают вид функциональной зависимости по экспериментальным данным и являются адаптивной моделью, которая подстраивает структуру сети под новые наблюдения и позволяет объяснить довольно сложные связи между значениями расхода электроэнергии и показателями магистрального газопровода.

*Ключевые слова:* компрессорная станция; аппарат воздушного охлаждения газа; прогнозирование; нейронные сети.

Начиная с 2000 г. в ОАО «Газпром» вопросы энергоэффективности и энергосбережения являются приоритетным направлением деятельности, и представляют собой комплекс программных мер, направленных на рациональное использование и экономию расхода топливно-энергетических ресурсов [1].

Планирование электропотребления на компрессорной станции является неотъемлемой частью экономии потребления топливно-энергетических ресурсов. Потребителями электроэнергии на компрессорной станции (КС) с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами являются электродвигатели с короткозамкнутым ротором: маслонасосов, пожарных насосов, компрессоров, вентиляторов общеобменной вентиляции, вентиляторов воздушного охлаждения газа и запорно-регулирующей аппаратуры.

Объектом исследования являются проектируемые компрессорные станции на участке «Петровск-Писаревка» магистральный газопровод «Уренгой-Новопсков» (КС «Петровск», КС «Екатериновка», КС «Балашов», КС «Бубновка», КС «Калач»). Провели расчеты основных показателей расхода электроэнергии на компрессорных станциях. На основании расчетов построен график (рис. 1) для оценки потребления электроэнергии АВО газа и компрессорной станции в целом. Анализ величины расхода электроэнергии показывает, что основным потребителем электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными перекачивающими агрегатами и в газотранспортной системе в целом является электропривод аппарата воздушного охлаждения газа. Охлаждение газа является наиболее энергоемким процессом (от 22 % и до 48 % расхода электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными перекачивающими агрегатами).

Работа выполняется в рамках государственного задания Министерства образования и науки России № 8.2668.2014/К.

Энергетическая эффективность АВО газа может быть оценено из уравнения теплового баланса тепловых потоков:

$$G_{п.р.п}(T_{1АВО} - T_{2АВО}) = G_{в.р.в}(T_2 - T_1), \quad (1)$$

где  $G_{п}$  - массовый расход охлаждаемого продукта в АВО газа, кг/с;  $T_1$  - температура воздуха, К;  $T_2$  - температура воздуха после прохождения АВО газа, К;  $c_{р,п}$  - удельная теплоемкость газа для расчетного режима работы АВО, кДж/(кг·К), вычисляются по формуле:

$$c_{р,п} = 1,695 + 1,838 \cdot 10^{-3} \cdot T_{АВОср} + 1,96 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{P_{АВОср} - 0,1}{T_{АВОср}^3},$$

$$T_{АВОср} = \frac{T_{1АВО} + T_{2АВО}}{2},$$

$$P_{АВОср} = \frac{P_{1АВО} + P_{2АВО}}{2},$$
(2)

где  $T_{1АВО}$  - температура газа на входе в АВО газа, К;  $T_{2АВО}$  - температура газа на выходе в АВО газа, К;  $P_{1АВО}$  - давление газа на входе в АВО газа, МПа;  $P_{2АВО}$  - давление газа на выходе в АВО газа, МПа;  $c_{р,в}$  - удельная теплоемкость воздуха, справочные данные, кДж/(кг·К);  $G_{в}$  - массовый расход воздуха, кг/с, определяется по формуле:

$$G_{в} = V_{в} \rho_{в},$$
(3)

где  $\rho_{в}$  - плотность воздуха, зависит от температуры окружающей среды, справочные данные, кг/м<sup>3</sup>.

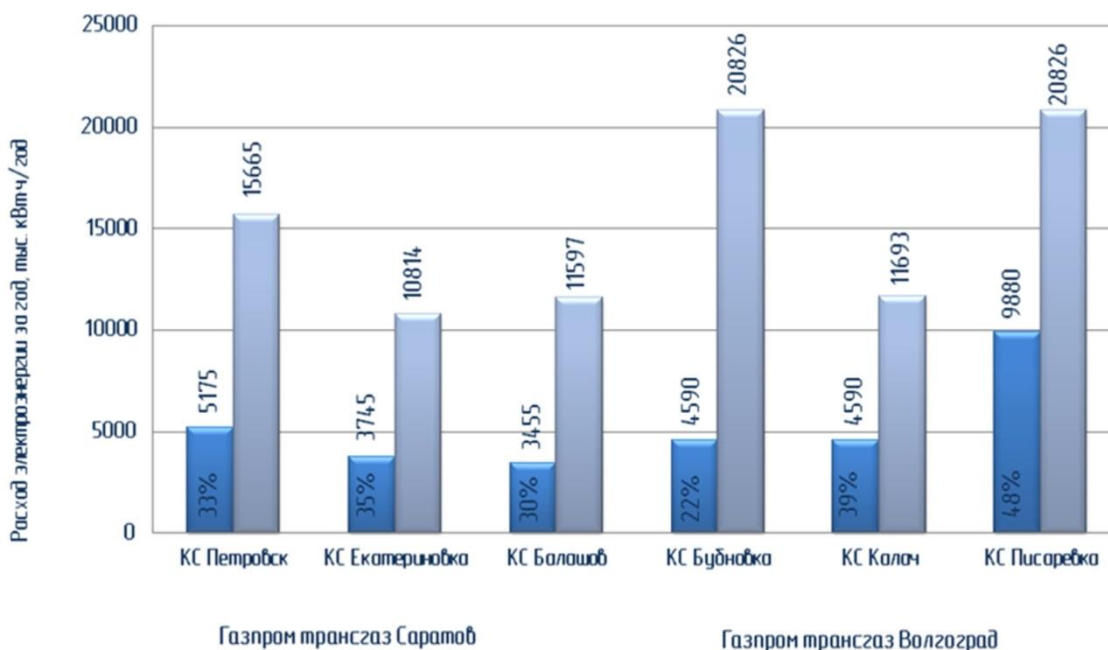


Рис. 1. Расход электроэнергии за год компрессорной станцией и АВО газа в абсолютном и процентном отношении

Проанализировав вышеуказанные уравнения, можно записать следующее уравнение:

$$E_{АВО} = Q_T(V_{в}, w_{в}, T_1),$$
(4)

где  $Q_T(V_{в}, w_{в}, T_1)$  - тепловая нагрузка АВО, которая является функцией объемного расхода воздуха  $V_{в}$ , скорости воздуха в узком сечении теплообменных секций  $w_{в}$  и температуры наружного воздуха  $T_1$ . Из перечисленного следует, что на потребление электрической энергии влияют следующие факторы:

- конструктивные и эксплуатационные характеристики теплообменных секций АВО и вентиляторов;
- технические характеристики электродвигателей;
- технические характеристики трансформатора и кабельной линии;

- технические характеристики коммутационно-регулирующей аппаратуры;
- алгоритм управления электродвигателями вентиляторов при изменении режимных параметров охлаждаемого продукта.

Автоматизация управления процессом охлаждения АВО газа позволит:

- минимизировать суммарное включение электродвигателей и общей продолжительности их работы в установившемся режиме;
- уменьшить потребление электроэнергии, возможность снижения 10–15%.

Применение системы стабилизации температуры газа с регулируемым приводом вентиляторов в общем случае может быть представлена структурной схемой, которая показана на рис. 2. Объектом управления являются теплообменные секции, через которые проходит охлаждаемый газ. Начальная температура газа  $T_{вх}$ , его массовый расход  $G_n$ , а также температура охлаждающего воздуха  $T_1$  являются возмущающими воздействиями. Частоты вращения  $\omega_k$  вентиляторов, определяющие массовые расходы воздуха  $G_{вк}$ , служат управляющими воздействиями в системе стабилизации температуры  $T_{вых}$ . На рис. 2 представлена структурная схема управления.

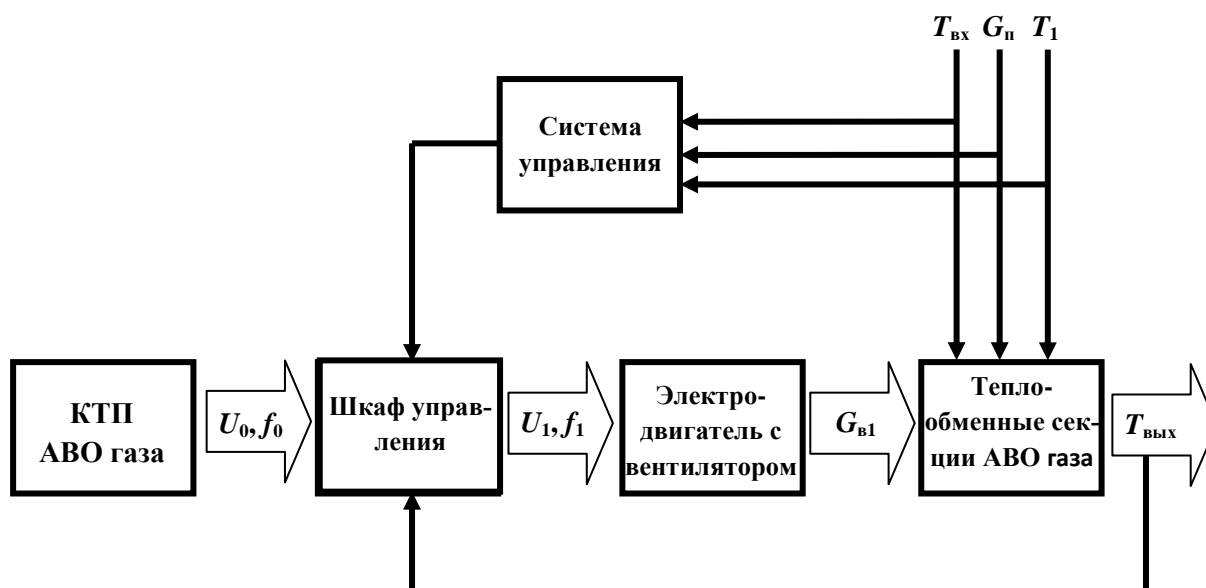


Рис. 2. Структурная схема управления АВО газа

Недостатком представленной структурной схемы является отсутствие оценки воздействия внешней и внутренней среды в полном объеме. Так, изменение температуры окружающей среды влияет на температурные параметры транспортируемого газа, изменение же параметров газа в газопроводе при его движении зависит от температуры грунта, от степени сжатия на компрессорной станции, температуре на входе и на выходе компрессорной станции, пропускной способности магистрального газопровода, режима работы аппаратов воздушного охлаждения газа. Авторами выполнена оценка вышеуказанной структурной схемы управления. Неопределенность воздействия внешней и внутренней среды трубопроводной системы делает задачу автоматизации электротехнического комплекса, а именно АВО газа, частью сложного процесса при транспортировке газа.

С нашей точки зрения эффективным решением является использование в структурной схеме управления АВО газ блока искусственных нейронных сетей (ИНС) с выводом данных по управлению электротехническим комплексом (АВО газа). Привлекательность применения ИНС состоит в возможности использования большого числа выходных параметров, что является для представления информационной модели на основе данных наблюдения над реальной системой.

Архитектурой ИНС является многослойный перцептрон с двумя скрытыми слоями. В этом случае нейронная сеть представлена в следующем виде:

$$\widehat{W}(t) = f_3 \left( w_{30} + \sum_{k=1}^K w_{3k} f_2 \left( w_{20m} + \sum_{m=1}^M w_{2m} f_1 \left( w_{10i} + \sum_{i=1}^n w_{1i}(t) \right) \right) \right), \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  – число нейронов входного слоя;  $m = 1, 2, \dots, M$  – число нейронов первого скрытого слоя;  $k = 1, 2, \dots, K$  – число нейронов второго скрытого слоя;  $f_1, f_2, f_3$  – функции активации нейронов первого и второго слоев;  $w_{10}, w_{20m}, w_{30}$  – начальное возбуждение  $i$ -го,  $k$ -го нейрона первого и второго скрытого и входного слоев;  $x_i(t)$  –  $i$ -я координата входного вектора.

В многослойном перцептроне значения независимых переменных поступает на нейроны входного слоя, от которого сигнал передается на нейроны скрытого слоя, а затем поступают на выходные нейрон.

Функция активации нейронов скрытого слоя - гиперболический тангенс (tansig); выходного слоя - линейная функция (purelin). Предполагается, что функции активации нейронов одного слоя одинаковые. Для обучения искусственной нейронной сети используется алгоритм LM Левенберга – Марквардта, данный алгоритм реализует оценку матрицы Гессе. Алгоритм LM использует аппроксимацию гессиана. Когда коэффициент  $\mu$  равен 0, получаем метод Ньютона с приближением гессиана в форме  $H \cong J^T J$ , когда значение  $\mu$  велико, получаем метод градиентного спуска с маленьким шагом. Алгоритм обучения действует итеративно, и его шаги называют эпохами. Процедура обучения представляет собой отображение множества экспериментальных данных на множество параметров (весовых коэффициентов) нейросетевой модели с целью получения оптимального в силу некоторого критерия, выходного сигнала. Для набора данных обучения вектор синаптических весов  $w$  можно вычислить путём минимизации функции стоимости по  $w$ :

$$E_c(w) = \frac{1}{2N} \sum_t (Y(t) - F(X(t), w))^2, w \in W. \quad (6)$$

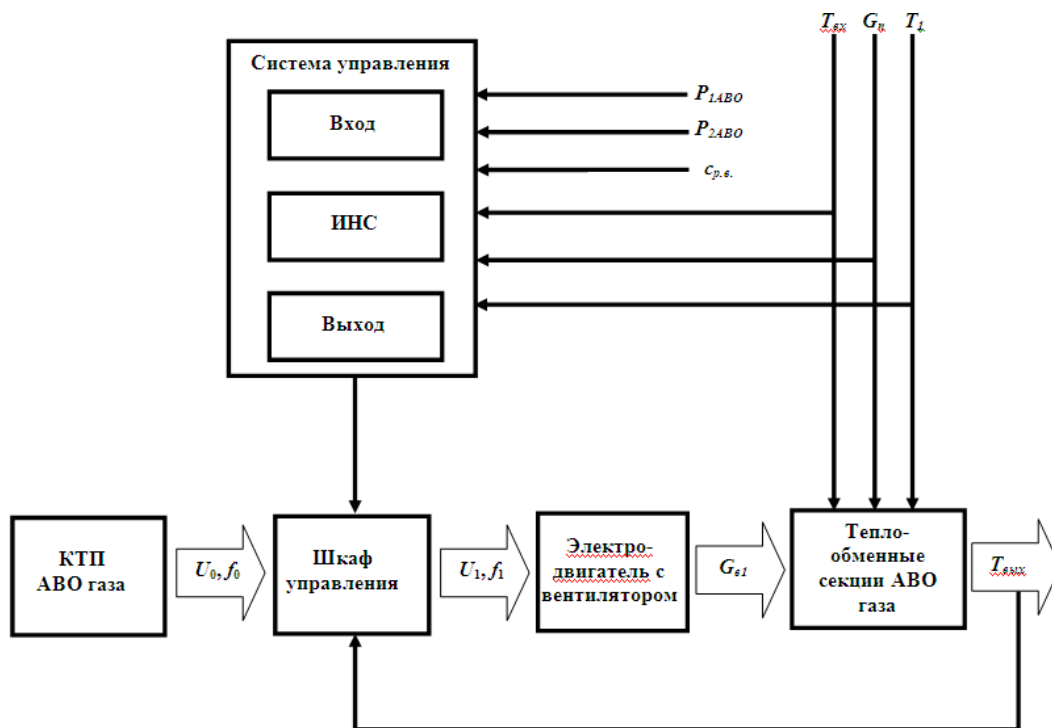


Рис. 3. Структурная схема управления АВО газа

Структурную схему управления электроприводом АВО газа предлагается выполнить в следующем виде, см. рис. 3. Техническим результатом, достигаемым при осуществлении

данной схемы управления, является обеспечение устойчивой работы системы, требуемого качества регулирования температуры охлаждаемой среды в широком диапазоне изменений климатических условий эксплуатации, режимов транспортировки охлаждаемого продукта, с учетом прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов.

#### Библиографический список

1. **Рубцова, И.Е.** Основные направления и задачи энергосбережения при реконструкции КС. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / И.Е. Рубцова, Д.С. Мочалин, О.В. Крюков; под ред. О.В.Крюкова. – Н.Новгород: Вектор ТиС. 2012. Т. 3. – 572 с.
2. **Иглин, С.П.** Математические расчеты на базе MATLAB / С.П. Иглин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 640 с.
3. **Мочалин, Д.С.** Современные принципы построения схем электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения газа // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 9(16). С. 100–102.
4. **Mochalin, D.S.** Invariant control system of the gas air cooled heat exchangers / D.S. Mochalin, V.G. Titov // Science, Technology and Higher Education, 2013, P. 391–396 – Режим доступа: [http:// science-canada.com/ru/archive.php](http://science-canada.com/ru/archive.php) (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

*Дата поступления  
в редакцию 15.12.2014*

**D.N. Lapaev, D.S. Mochalin, V.G. Titov**

### **DIRECTION OF THE AIR COOLED HEAT EXCHANGER OF GAS ON THE COMPRESSOR STATION**

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

**Purpose:** Search of the best regression model represents quite bulky process.

**Design / methodology / approach:** Forecasting and power consumption planning at compressor station (CS) is an integral part of economy of consumption of fuel and energy resources.

**Results:** Developed a direction system of the air cooled heat exchanger of gas on the compressor station.

**Restrictions/values of research:** Energy efficiency and energy saving are priority activity, and represents a complex of the program measures directed on rational use and economy of an expense of fuel and energy resources.

**Novelty/value:** Use of neural networks which possess a number of advantages before regression models: select a type of functional dependence for experimental data and are adaptive model which arranges network structure under new supervision and allows to explain quite difficult communications between values of an expense of the electric power and indicators of the main gas pipeline.

*Key words:* compressor station; air cooled heat exchanger (ACHE) of gas; forecasting; neural networks.