



УДК 622.323: 621.313

DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.21

**А. И. ДАНИЛУШКИН
В. А. ДАНИЛУШКИН**

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОДГОТОВКИ ГАЗА К ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПО МАГИСТРАЛЬНОМУ ТРУБОПРОВОДУ

**EFFICIENT CONTROL OF FUNCTIONING OF ELECTRICAL
GAS PREPARATION COMPLEX TO TRANSPORTATION BY MAIN PIPELINE**

Рассматривается проблема повышения эффективности функционирования линейного участка магистральной газопроводной системы за счет разработки эффективных алгоритмов управления режимами работы установки охлаждения газа. Для разработки алгоритмов управления установкой охлаждения газа используются адаптированные математические модели тепловых процессов в аппаратах воздушного охлаждения газа и в газопроводе. Показано, что при рассмотрении динамических режимов газопроводную систему можно представить состоящей из двух динамических звеньев. Звено «установка охлаждения газа», включающее до 24 электроприводов с теплообменными аппаратами, характеризуется относительно небольшими постоянными времени. В магистральном газопроводе процессы теплообмена протекают значительно медленнее. Это обстоятельство позволяет основное внимание сосредоточить на разработке эффективной системы управления установкой охлаждения. Управление осуществляется путем дискретного или непрерывного изменения расхода охлаждающего воздуха через теплообменник за счет регулирования числа включенных аппаратов воздушного охлаждения и изменения частоты вращения вентиляторов. Поиск алгоритмов управления аппаратами воздушного охлаждения осуществляется путем постановки и решения задачи минимизации среднеквадратичного отклонения температуры газа на выходе из теплообменного аппарата от требуемого значения. Для реализации

The article discusses the problem of increasing the efficiency of the linear section of the main gas pipeline system by developing effective control algorithms for the operating modes of the gas cooling unit. To develop control algorithms for a gas cooling unit, adapted mathematical models of thermal processes in air-cooled gas devices and in a gas pipeline are used. It is shown that when considering the dynamic modes, the gas pipeline system can be represented as consisting of two dynamic links. The link “gas cooling unit”, which includes up to 24 electric drives with heat exchangers, is characterized by relatively short time constants. In the main gas pipeline, heat exchange processes proceed much more slowly. This circumstance allows the main attention to be focused on the development of an effective control system for the cooling plant. The control is carried out by discrete or continuous change in the flow rate of the cooling air through the heat exchanger by adjusting the number of switched on air coolers and changing the fan speed. The search for control algorithms for air coolers is carried out by formulating and solving the problem of minimizing the root-mean-square deviation of the gas temperature at the outlet from the heat exchanger from the required value. To implement the obtained control algorithms, a functional diagram of the automatic control system for the operating modes of the gas cooling unit has been developed.

полученных алгоритмов управления разработана функциональная схема системы автоматического управления режимами работы установки охлаждения газа.

Ключевые слова: магистральный газопровод, математическое моделирование, теплообмен, управление, переходные режимы, энергосбережение

Введение

Для увеличения пропускной способности магистральной трубопроводной системы, повышения надежности и эффективности эксплуатации технологического оборудования транспортируемый газ на выходе из газоперекачивающего агрегата охлаждают. Поставленная задача как правило решается с помощью установок воздушного охлаждения [1–4], которые включают до 24 теплообменных аппаратов с электроприводными вентиляторами.

Изменение производительности магистрального трубопровода, сезонные и суточные колебания температуры охлаждающего воздуха и другие внешние возмущения приводят к необходимости применения оперативной системы управления процессом охлаждения газа. Существующие способы отличаются как технической реализацией, так и точностью стабилизации температуры газа, но практически все способы основываются на изменении расхода охлаждающего воздуха с помощью вентиляторов [5, 6].

Исследуемые процессы относятся к классу наиболее сложных распределенных систем, обладающих существенными нелинейностями. Это затрудняет применение аналитических методов исследования процессов теплообмена и обуславливает использование численно-аналитических или численных математических моделей тепловых и гидравлических процессов [7–9]. Упрощение математических моделей в ряде случаев обеспечивает достаточную точность аппроксимации процессов и позволяет реализовать систему управления с заданными показателями.

Функциональная схема трубопроводной системы «установка охлаждения газа – магистральный газопровод»

Рассматриваемый объект состоит из энергоёмкой многодвигательной установки охлаждения газа (УОГ) с приводными асинхронными электродвигателями и магистрального газопровода. На рис. 1 представлена функциональная схема системы «установка охлаждения газа – магистральный газопровод». Здесь УОГ –

Keywords: main gas pipeline, mathematical modeling, heat exchange, control, transient modes, energy saving

установка охлаждения газа, включающая ряд аппаратов воздушного охлаждения.

Измеряемыми параметрами в системе управления температурным режимом газа являются температура охлаждающего воздуха, температура и давление газа на входе и выходе системы охлаждения. В качестве внешнего возмущающего воздействия рассматривается коэффициент конвективного теплообмена между потоком газа и воздухом.

В процессе эксплуатации система «установка охлаждения газа – газопровод» испытывает влияние внешних условий, вследствие чего изменяются температура и давление газа на входе в магистральный газопровод. Как показали исследования [7–9], из-за значительной разницы в динамических процессах, происходящих в установке охлаждения газа и в магистральном газопроводе, систему «установка охлаждения газа – газопровод» можно представить в виде двух последовательно соединенных звеньев: «звена с относительно малой постоянной времени» – установки охлаждения газа и «звена с большой постоянной времени» – газопровода.

Для синтеза системы управления температурным режимом газа необходимо разработать математические модели процессов теплообмена в рассматриваемом объекте управления. Существует достаточно много исследований частного характера, посвященных этой проблеме [10, 11].

В процессе транспортировки температура и давление газа изменяются как во времени, так и по длине трубопровода. Температура $T_{TP}(x, t)$ трубы и давление $P_{TP}(x, t)$ в каждой точке трубопровода $x \in [0, L_{TP}]$ описываются в общем случае системой взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. При этом в качестве параметров, влияющих на распределение температуры и давления, рассматриваются:

- изменение температуры $T_{TP1}(t)$ и давления $P_{TP1}(t)$ на входе трубопровода;
- изменение давления $P_{TP2}(t)$ на выходе трубопровода;
- температура $T_{OC}(x, t)$ окружающей среды в зоне расположения трубопровода;

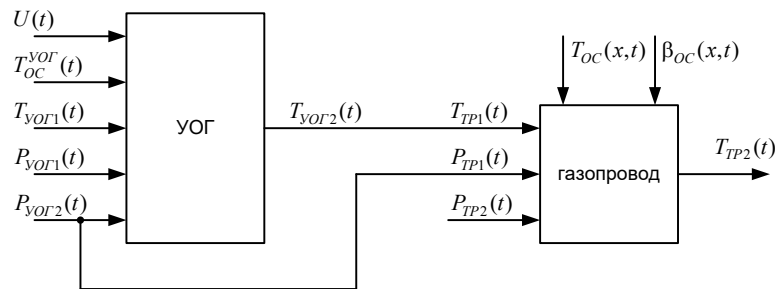


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления

– коэффициент конвективного теплообмена $\beta_{OC}(x, t)$ между потоком газа и окружающей средой.

Характер изменения температуры $T_{yog2}(t)$ газа на выходе установки охлаждения зависит от температуры $T_{yog1}(t)$ газа и давления $P_{yog1}(t)$ на входе УОГ; давления $P_{yog2}(t)$ газа на выходе УОГ; температуры $T_{OC}^{yog}(t)$ окружающей среды; режимов работы аппаратов воздушного охлаждения.

Математическая модель процессов теплообмена в магистральном газопроводе

Математическая модель процессов теплообмена в трубопроводе может быть получена на основании уравнения теплового баланса для потока газа с учётом переменной скорости потока [6, 8–10]:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + V(t) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} = \beta_{cp} (T_{cp}(x, t) - \theta(x, t)), 0 \leq x \leq x_1, t > 0 \tag{1}$$

с краевыми условиями

$$\theta(x, t)_{t=0} = \theta_0, \tag{2}$$

$$\theta(x, t)_{x=0} = \theta_{gas}(t). \tag{3}$$

Здесь $\theta(x, t)$ – температура газа в контролируемой точке; $T_{cp}(x, t)$ – температура грунта; $\theta_{gas}(t)$ – температура газа на входе линейного участка трубопровода; $V(t)$ – скорость потока газа в трубопроводе; β_{cp} – приведённый коэффициент конвективного теплообмена между грунтом и потоком газа; x_1 – длина линейного участка газопровода.

Температура грунта $T_{cp}(x, t)$ по длине газопровода определяется, с одной стороны, температурой газа в этой точке, с другой – температурой наружного воздуха $T_{возд}(x, t)$. Теплопроводность стенки газопровода значительно выше теплопроводности грунта, поэтому стенка принимается теплотехнически тонким телом и не учитывается в модели.

Уравнение (1) аналитически не решается, поскольку содержит произведение двух функций, зависящих от времени:

$$V(t) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x}.$$

В практически реализуемых процессах с некоторыми допущениями можно линеаризовать уравнение (1) и решить аналитически полученное линеаризованное уравнение.

Линеаризованное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + V_c \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} + \beta_{cp} \theta(x, t) = \beta_{cp} T_{cp}(x, t) - \Delta V(t) T_{cp} \frac{\beta_{cp}}{V_c} \exp\left(-\frac{x \beta_{cp}}{V_c}\right). \tag{4}$$

Решение получено в виде [13]:

$$\theta(x, p) = \int_0^{x_1} W(x, \xi, p) \cdot \omega(\xi, p) d\xi, \tag{5}$$

где

$$W(x, \xi, p) = 1(x - \xi) \cdot \exp\left(-\frac{p + \beta_{cp}}{V} \cdot (x - \xi)\right), \quad (6)$$

$$\omega(x, p) = \beta_{cp} \cdot T_{cp}(x, p) V_C \cdot \delta(x) \cdot \theta_{gas}(p) - \Delta V(p) T_{cp} \frac{\beta_{cp}}{V_C} \exp\left(-\frac{x \beta_{cp}}{V_C}\right). \quad (7)$$

Расчет температуры выполнен в разработанной Simulink-модели [11, 12], представленной на рис. 2.

Идентификация полученной модели производилась по результатам физических экспериментов на одном из магистральных участков трубопровода.

Входными сигналами модели являются температура газа на входе в линейный участок трубопровода – $T_{gas\ in}$, температура воздуха в начале и в конце линейного участка газопровода – $T_{air\ 1}$, $T_{air\ 2}$, изменение скорости потока газа dV/V . Математическая модель учитывает скорость потока газа, зависящую от объёмного расхода газа, давления и площади поперечного сечения трубопровода.

Математическая модель процесса охлаждения газа в теплообменном аппарате

Математическая модель процесса охлаждения газа в теплообменном аппарате с учетом некоторых допущений получена на основании уравнения теплового баланса, в соответствии с которым распределение температуры $T(x, t)$ по длине трубки теплообменника описывается уравнением [6–10]:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \beta(t) \cdot (T_{cp} - T(x, t)), \quad (8)$$

с краевыми и начальными условиями

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad T(0, t) = g(t), \quad (9)$$

где v – скорость потока; $v = F/S_{mp}$; F – расход газа; S_{mp} – площадь поперечного сечения трубки; T_{cp} – температура воздуха; $T_0(x)$ – начальное распределение температуры; $g(t)$ – функция изменения температуры газа на входе теплообменника.

Согласно структурной теории распределённых систем [13], передаточная функция объекта управления на основании уравнения (8) принимает вид:

$$W(x, \xi, p) = 1(x - \xi) \cdot \frac{1}{v} \cdot \exp\left[-\frac{1}{v}(p + \beta) \cdot (x - \xi)\right], \quad (10)$$

где $1(x - \xi)$ – передаточная функция пространственно-интегрирующего блока.

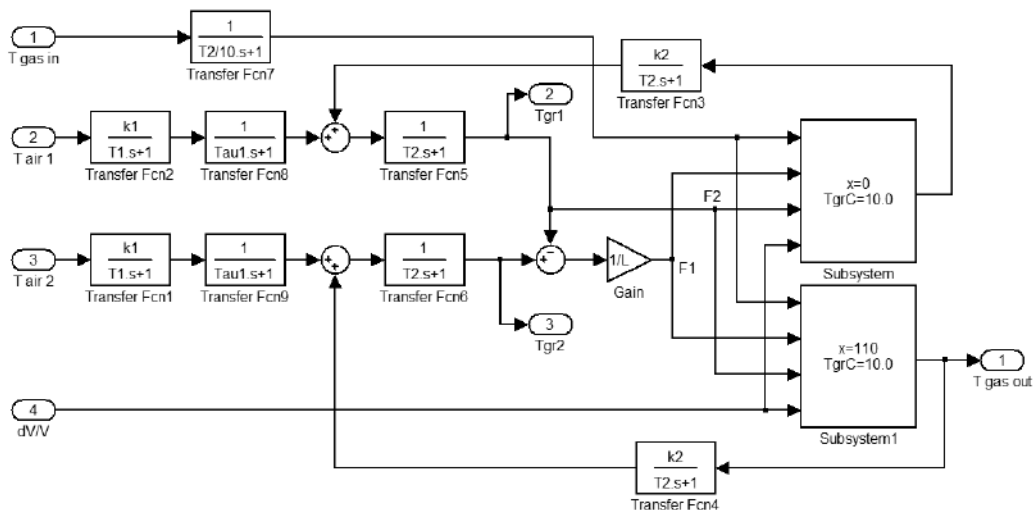


Рис. 2. Simulink-модель температуры газа на выходе линейного участка газопровода в зависимости от температур воздуха

Передаточные функции объекта по различным каналам управления принимают вид:

– по каналу «изменение коэффициента теплообмена – температура газа на выходе теплообменника»

$$W_{\Delta\beta}(p) = T_{cp} \frac{1}{p} \left[\exp\left(-\frac{\beta_c}{v} L\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{v} L\right)\right) \right]; \quad (11)$$

– по каналам «температура воздуха – температура газа на выходе» и «температура газа на входе теплообменника – температура газа на выходе» соответственно:

$$W_B(p) = \frac{1}{\beta_c p + 1} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{v}(p + \beta_c)L\right) \right], \quad (12)$$

$$W_r(p) = \exp\left(-\frac{1}{v}(p + \beta_c)L\right). \quad (13)$$

Структурная схема объекта управления представлена на рис. 3. Здесь $\Delta\bar{\beta}(p)$ – изменение коэффициента теплообмена – рассматривается в качестве управляющего воздействия, а температура воздуха $\bar{T}_B(p)$ и температура газа на входе теплообменника $\bar{T}_r(p)$ – как возмущающие воздействия.

Полученная аналитическая модель используется для синтеза системы автоматического управления температурой газа на выходе аппарата воздушного охлаждения.

Решение задачи управления системой охлаждения газа

Комплексная задача снижения энергозатрат на перекачку газа предполагает регулирование как температуры газа, так и расхода газа. Известно, что изменение расхода приводит к снижению экономической эффективности магистрального трубопровода. Одним из эффективных способов повышения экономичности является вариант комплексного решения задачи выбора режима работы установки охлаждения газа и регулирования давления газа.

При решении задачи выбора режима работы магистрального трубопровода необходимо учитывать наличие ограничений на технологические параметры и на управляющие воздействия.

Задача оптимального управления по критерию точности формулируется следующим образом [14].

Для объекта, описываемого уравнением (8), найти управляющую функцию, обеспечивающую выполнение соотношения

$$\max |T_{зад}(L) - T(G_{opt}(t), L, t)| = \min \left[\max |T_{зад}(L) - T(G(t), L, t)| \right] \quad (14)$$

в условиях глубоких возмущений при смене производительности или температуры газа на входе в теплообменник при наличии энергетических и технологических ограничений вида

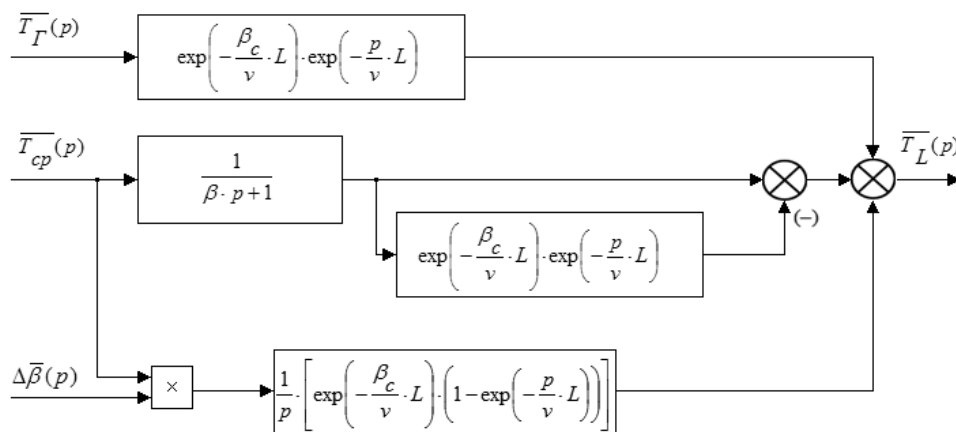


Рис. 3. Структурная схема аппарата воздушного охлаждения

$$G_{\min} \leq G(t) \leq G_{\min} . \quad (15)$$

Согласно принципу максимума для систем с распределенными параметрами [13], оптимальный алгоритм управления $G_{\text{opt}}(t)$ принимает вид

$$G_{\text{opt}}(t) = \begin{cases} \frac{G_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \int_0^x \Psi(x, t) dx \right], & \text{если } \int_0^x \Psi(x, t) dx \neq 0, \\ G_{\text{oc}}(t), & \text{если } \int_0^x \Psi(x, t) dx = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Оптимальное управление имеет вид релейной функции, принимающей поочередно максимальное или минимальное значения. В том случае, когда управляющее воздействие в процессе выхода на новый установившийся режим не достигает предельного значения, задача поиска оптимального алгоритма сводится к определению формы и длительности участков оптимальной траектории

$$G_{\text{oc}}(t), \quad \text{если } \int_0^x \Psi(x, t) dx = 0$$

из условия

$$T_{\text{зад}}(L) = T_{\text{тек}}(L, t). \quad (17)$$

Задача определения оптимального алгоритма управления сводится к поиску формы, числа и длительности участков управления. Подставляя решение уравнения (8) с известными начальными условиями, соответствующими исходной производительности, в равенство (17), получаем после несложных преобразований оптимальный алгоритм управления процессом охлаждения газа при смене производительности в виде кусочно-постоянной функции, сходящейся к новому установившемуся значению

$$G_n(t) = \frac{G_0 V_1}{V_0} \exp \left(-(n+1) \beta T_0 - \beta \frac{V_0 - V_1}{V_0} t \right) + \frac{\beta T_{\text{зад}}}{k} \sum_0^N \exp(-n \beta T_1), \quad \forall t \in [n T_1, (n+1) T_1]. \quad (18)$$

Здесь V_0 – скорость потока газа до изменения производительности; V_1 – скорость потока газа после изменения производительности.

Поскольку в реальной технологической ситуации допускаются определенные отклонения температуры газа на выходе из теплообменника, т. е. ставится цель попадания в заданную область с допустимой погрешностью, число интервалов оптимального управления можно разумно ограничить, определив его исходя из допустимой ошибки приближения к заданному значению.

Предложенная методика позволяет выработать оптимальный алгоритм управления АВО и оптимальную структуру системы автоматизированного управления в переходных режимах работы.

Функциональная схема системы автоматического управления установкой охлаждения газа

Общая функциональная схема замкнутой системы автоматического управления температурой газа на выходе аппарата воздушного охлаждения приведена на рис. 4.

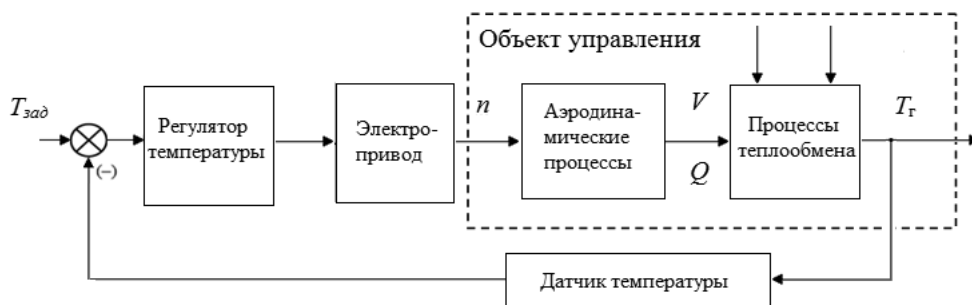


Рис. 4. Функциональная схема САУ температурой газа на выходе АВО

Регулирующим воздействием на объект управления является расход воздуха Q . Основными возмущающими воздействиями на объект управления являются температура наружного воздуха $T_{\text{вн}}$ и расход газа Q_g .

В качестве базовой принципиальной схемы для построения системы автоматического управления установкой охлаждения газа рассматривается структура, представленная на рис. 5.

Расход газа и его температура на входе установки, а также температура воздуха измеряются с помощью датчиков и проходят первичную обработку (масштабирование, фильтрацию). Далее каждое из значений поступает на соответствующий блок дискретизации [1], который осуществляет квантование сигнала по уровню, для исключения слишком частого вызова процедуры включения или отключения вентиляторов при незначительных изменениях измеряемых параметров. При переходе выхода блока дискретизации на новый уровень сигнальным блоком [2] формируется управляющий импульс, который поступает на блок логического сложения OR. Таким образом, изменение уровня любого из трёх параметров приводит к запуску перерасчёта оптимального управляющего воздействия. В результате работы алгоритма оптимизации формируются управляющие сигналы на включение или отключение вентиляторов, которые через устройства связи с объектом подаются на электроприводы вентиляторов установки охлаждения газа.

Решение задачи оптимизации за счёт включения или отключения вентиляторов обеспечивает температуру на выходе установки охлаждения газа не выше заданной. Это означает, что практически всегда температура будет несколько ниже заданной, другими словами, практически всегда будет возникать перерасход энергии из-за отсутствия возможности плавного регулирования вращения включенных вентиляторов. Дополнительная экономия электроэнергии достигается за счёт введения в структуру управления дополнительного контура стабилизации температуры на выходе установки путём плавного регулирования скорости вращения одного или двух вентиляторов с помощью частотного преобразователя.

Общий алгоритм функционирования автоматической системы управления аппаратами воздушного охлаждения выглядит следующим образом:

- 1) в результате изменения одного из входных параметров системы запускается расчёт оптимального распределения нагрузки между вентиляторами установки охлаждения газа;
- 2) по окончании расчёта подаются команды на включение/выключение вентиляторов установки охлаждения газа;
- 3) в процессе работы установки с помощью преобразователя частоты осуществляется точное регулирование температуры газа на выходе за счёт плавного регулирования скорости вращения вентиляторов одного или нескольких аппаратов воздушного охлаждения.

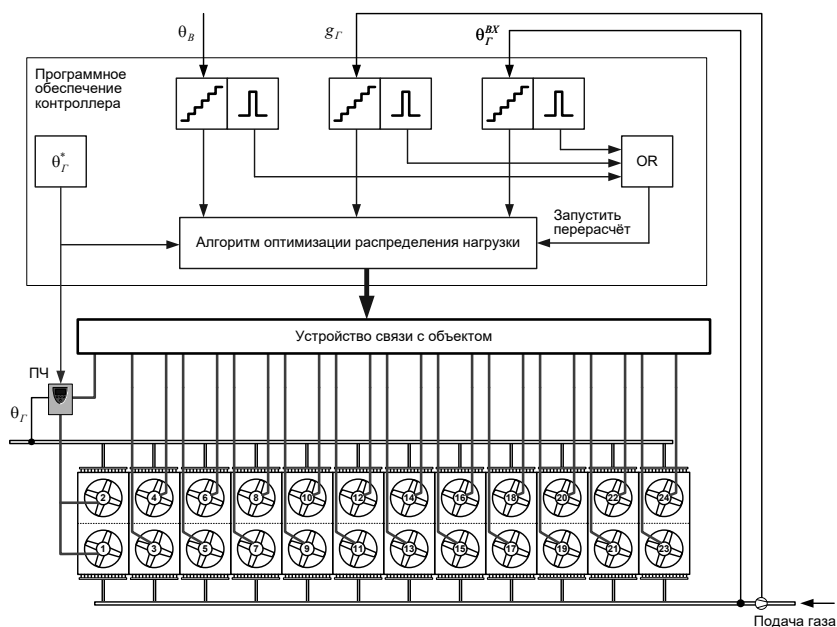


Рис. 5. Принципиальная схема автоматической системы оптимального распределения нагрузки

Еще одним положительным фактором такого комплексного подхода является возможность поддержания заданной температуры при варьировании входных параметров алгоритма оптимизации в пределах зон нечувствительности блоков дискретизации. Более того, при наличии двустороннего обмена информацией между преобразователем частоты и контроллером появляется возможность запуска расчёта оптимального распределения нагрузки по сигналу от преобразователя частоты по достижении максимальной или минимальной частоты вращения подключенных к нему вентиляторов, т. е. при выходе на ограничение по управляющему воздействию системы автоматического регулирования температурой газа на выходе установки охлаждения.

Заключение. Проведены исследование и анализ применяющихся в настоящее время технологий управления процессом охлаждения газа. Предложены численно-аналитические математические модели теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения и магистральном газопроводе, на основании которых проведён анализ и выявлены проблемные места эксплуатации магистрального трубопровода. Показано, что эффективное снижение энергозатрат на транспортировку газа возможно с помощью модернизации системы управления установкой охлаждения газа. Разработаны структурные схемы технической системы управления объектом «установка охлаждения газа – магистральный газопровод». Предложена двухуровневая система управления процессом охлаждения, включающая дискретное регулирование расхода воздуха изменением числа включенных вентиляторов и непрерывное регулирование изменением частоты вращения одного или нескольких регуляторов. Сформулированы рекомендации по усовершенствованию системы управления охлаждением газа. Разработан алгоритм функционирования автоматической системы управления аппаратами воздушного охлаждения, обеспечивающий энергоэффективный режим охлаждения газа. Предложена структура и разработана функциональная схема системы управления установкой охлаждения газа, реализующей полученные алгоритмы управления с учетом энергетических и технологических ограничений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поршаков Б.П., А.Н. Козаченко, В.И. Никишин. Пути и способы развития энергосберегающих технологий в трубопроводном транспорте газов // Изв. вузов. Нефть и газ. 2000. № 3. С. 57–63.
2. Махов О.Н., Субботин В.И., Ярунин С.Н., Ярунина Н.Н. Основные направления энергосбережения

в газоперекачивающей отрасли // Вестник ИГЭУ. 2005. № 1. С. 48–50.

3. Datsuk T., Pozin G., Ulyasheva V., Kanev M. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities // Procedia Engineering. 2015. № 117(2015). P. 237.

4. Данилушкин А.И., Крайнов В.Г., Мизачева Л.А. Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2011. Вып. № 3(31). С. 159–165.

5. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н. и др. // Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности. М.: Недра, 2002. 300 с.

6. Алимов С.В., Данилушкин И.А., Мосин В.Н. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2010. Вып. № 2(26). С. 178–186.

7. Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. Оптимизация электропотребления электротехнического комплекса установки охлаждения газа // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 1. С. 124–129.

8. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Моделирование процессов теплообмена между газопроводом и окружающей средой // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2015. Вып. № 2(46). С. 66–76.

9. Грабовец В.А., Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. и др. Метод моделирования температуры газа при транспортировке по магистральному газопроводу // Газовая промышленность. 2016. № 9(743). С. 26–30.

10. Oosterkamp A., Helgaker J.F., Ytrehus T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model // Energy Procedia. 2015. № 64(2015). P. 101–110.

11. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

12. Дудников Е.Е. Универсальные программные пакеты для моделирования систем с распределёнными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 1. С. 3–24.

13. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.

14. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределёнными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.

REFERENCES

1. Porshakov B.P., Kozachenko A. N., Nikishin V. I. Ways and methods of development of energy-saving technologies in pipeline transport of gases. *Izv. vuzov. Neft' i gaz* [News of universities. Oil and gas], 2000, no. 3, p. 57–63. (in Russian)

2. Makhov O.N. Subbotin VI, Yarunin SN, Yarunina NN. The main directions of energy saving in the gas pumping industry. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISUE], 2005, n.1, pp. 48 - 50. (in Russian)
3. Datsuk T., Pozin G., Ulyasheva V., Kanev M. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities. *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 237–243.
4. Danilushkin A.I., Kraynov V.G., Migacheva L.A. Optimization of stationary load distribution of gas air coolers. *Vestnik Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)], 2011, no. 3 (31), pp. 159-165. (in Russian)
5. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N. and others. *Novyye tekhnologii i sovremennoye oborudovaniye v elektroenergetike gazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in the electric power industry of the gas industry]. M.: Nedra, 2002. 300 p.
6. Alimov S.V., Danilushkin I.A., Mosin V.N. Modeling of steady-state heat transfer processes in gas air cooling devices. *Vestnik Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)], 2010, no. 2 (26), pp. 178-186. (in Russian)
7. A.I. Danilushkin, I.A. Danilushkin. Optimization of power consumption of the electrical complex of the gas cooling plant. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, Vol. 8, no. 1, pp. 124-129. (in Russian)
8. A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin. Modeling the processes of heat exchange between the gas pipeline and the environment. *Vestnik Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)], 2015, no. 2 (46), pp. 66-76. (in Russian)
9. Grabovets V.A., Danilushkin A.I., Danilushkin I.A. and others. Method for modeling gas temperature during transportation through the main gas pipeline. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2016, no. 9 (743), pp. 26-30.
10. Oosterkamp A. , Helgaker J.F., Ytrehus T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model. *Energy Procedia*, 2015, no. 64, pp. 101–110.
11. Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK: environment for creating engineering applications]. M.: DIALOG-MIFI, 2003. 496 p.
12. Dudnikov E.E. Universal software packages for modeling systems with distributed parameters. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2009, no. 1, pp. 3–24. (in Russian)
13. Rapoport E.Ya. *Strukturnoe modelirovaniye obektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami* [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. M.: Vysshaya shkola, 2003. 299 p.
14. Rapoport E.Ya. *Optimalnoye upravleniye sistem s raspredelennymi parametrami* [Optimal control of systems with distributed parameters]. M: Visshaya shkola, 2009. 677 p.

Об авторах:

ДАНИЛУШКИН Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

ДАНИЛУШКИН Василий Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

DANILUSHKIN Aleksandr I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

DANILUSHKIN Vasily A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

Для цитирования: Данилушкин А.И., Данилушкин В.А. Эффективное управление функционированием электротехнического комплекса подготовки газа к транспортировке по магистральному трубопроводу // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 2. С. 162–170. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.21.

For citation: Danilushkin A.I., Danilushkin V.A. Efficient Control of Functioning of Electrical Gas Preparation Complex to Transportation by Main Pipeline. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 2, Pp. 162–170. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.21.