

Электротехника

УДК 62-83:622

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А.М. Абакумов, И.П. Степашкин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Приведены результаты исследования разработанной адаптивной системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа. Выполнен сравнительный анализ адаптивной системы с эталонной моделью объекта управления и двухконтурной системы автоматического управления. Проведен анализ возможности упрощения эталонной модели за счет отказа от учета инерционности электропривода и датчика обратной связи. Исследованы динамические характеристики систем с полной и упрощенной моделью. По результатам компьютерного эксперимента проведена оценка робастных свойств адаптивной системы управления с полной и упрощенной моделью. Рассчитаны кривые переходных процессов адаптивной системы с полной и упрощенной моделью при вариациях параметров объекта управления. Дана оценка запаса устойчивости систем при вариации параметров объекта управления.*

Ключевые слова: *аппарат воздушного охлаждения природного газа, адаптивная система автоматического управления, оценка робастных свойств, динамические характеристики системы, адаптивная система с эталонной моделью, запас устойчивости системы, вариации параметров объекта управления.*

В современных условиях при модернизации и проектировании установок охлаждения (УОГ) природного газа компрессорных станций магистральных газопроводов получают все большее применение системы автоматического управления (САУ) температурой газа на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП) вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения (АВО). По сложившейся терминологии такие системы называют САУ АВО газа [1]–[8]. Переход от дискретного способа регулирования частоты вращения вентиляторов к непрерывному, с использованием ЧРП, позволяет существенно уменьшить затраты электроэнергии на нужды охлаждения, а также благодаря использованию замкнутых САУ обеспечивает повышение точности и надежности поддержания требуемых температурных режимов работы УОГ [9–12].

Характерной особенностью обобщенного объекта управления (ОУ), вклю-

Абакумов Александр Михайлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Степашкин Иван Павлович, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

чающего аэродинамические процессы и процессы теплообмена, рассматриваемых САУ является достаточно широкий диапазон вариаций параметров ОУ. В частности, коэффициент передачи ОУ может изменяться в 8...10 раз [13–14]. Эти вариации связаны прежде всего с изменением температуры наружного воздуха в течение суток и в зависимости от времени года, а также с изменением производительности компрессорной станции. В связи с достаточно медленным изменением характеристик ОУ по сравнению со временем переходных процессов в замкнутой системе при исследовании динамики САУ параметры объекта можно считать «замороженными».

При синтезе подобных систем предполагается, что информация об объекте и внешней среде не известна точно, а лишь задана с некоторой достоверностью. Достоверность при этом задается интервалами принадлежности (классами неопределенности) [15].

По результатам экспериментальных исследований математическая модель обобщенного ОУ [16] может быть задана в виде класса динамических объектов, описываемых дифференциальным уравнением первого порядка, а передаточная функция (ПФ) объекта может быть представлена в виде аperiodического звена первого порядка:

$$W_O(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_O}{(T_O p + 1)}, \quad (1)$$

$$k_O \in [k_{Omin}, k_{Omax}]; T_O \in [T_{Omin}, T_{Omax}],$$

где θ, f – температура газа на выходе АВО и частота вращения вентиляторов; $k_{Omin}, k_{Omax}; T_{Omin}, T_{Omax}$ – нижние и верхние границы коэффициента передачи и постоянной времени ОУ.

Требуемое качество управления рассматриваемым ОУ может быть обеспечено использованием двухконтурной системы [5], а также адаптивной системы с эталонной моделью [17].

В [7] показано, что для исключения перерегулирования частоты вращения вентиляторов, ведущего к неблагоприятным динамическим нагрузкам в кинематической части привода, в цепь обратной связи САУ целесообразно включить ПД-регулятор с ПФ:

$$W_{R3} = (T_{R3}p + 1), T_{R3} = T_{O.N}, \quad (2)$$

где $T_{O.N}$ – постоянная времени объекта с номинальными параметрами (номинального объекта) с ПФ:

$$W_{O.N}(p) = -\frac{k_{O.N}}{(T_{O.N}p + 1)}. \quad (3)$$

С учетом указанного структурная схема системы с эталонной моделью может быть представлена в виде рис. 1.

Динамические свойства отдельных элементов для приращения переменных отражены соответствующими ПФ: $W_E(p)$ – электропривода; $W_O(p)$ – обобщенного объекта управления; $W_S(p)$ – датчика температуры на выходе АВО; $W_M(p)$ – эталонной модели; $W_{R1}(p), W_{R2}(p), W_{R3}(p)$ – регуляторов (на структурной схеме и далее по тексту оператор p для упрощения записи опущен).

Задающий сигнал на входе системы – x ; выходная регулируемая координата – температура газа θ на выходе АВО; частота вращения вентиляторов – f .

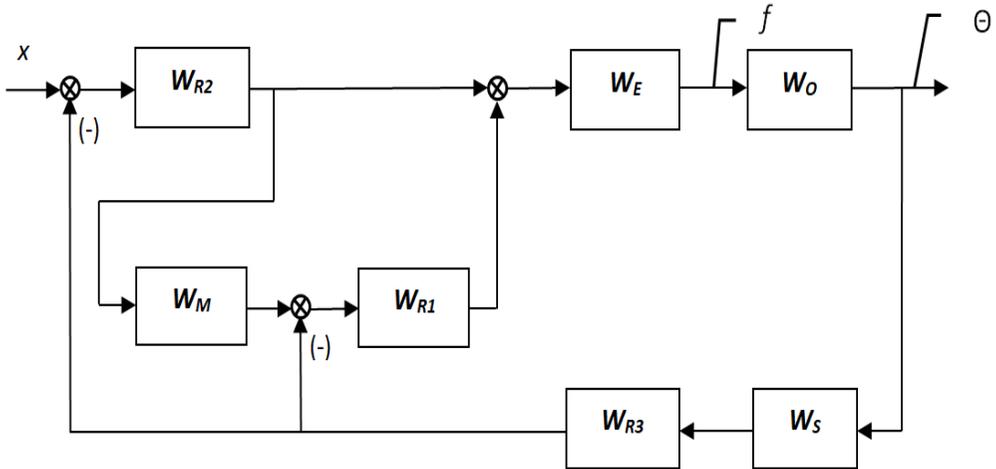


Рис. 1. Структурная схема системы с эталонной моделью

ПФ эталонной модели с учетом соотношений (2), (3) принята в виде

$$W_M = k_{O.N} W_E W_S. \quad (4)$$

Для сравнения динамических характеристик адаптивной системы с моделью и двухконтурной системы, рассмотренной в [5], схема на рис. 1 преобразована к виду, представленному на рис. 2.

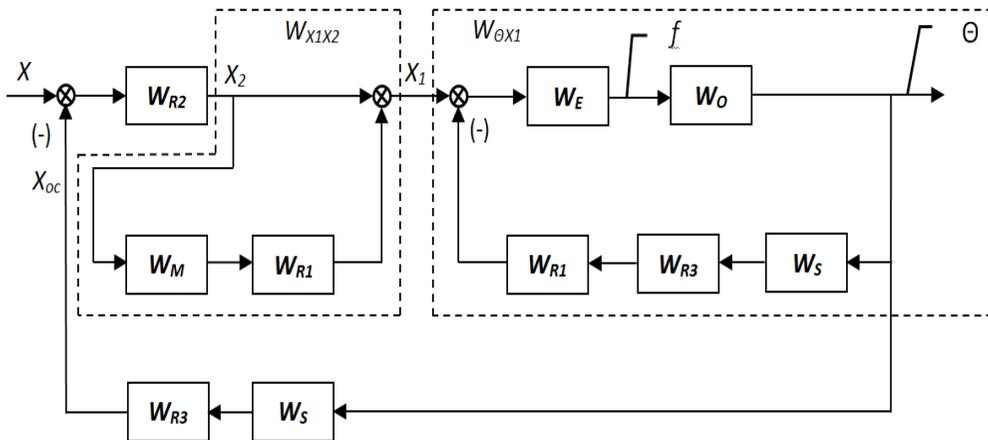


Рис. 2. Преобразованная структурная схема системы

ПФ внутреннего замкнутого контура имеет вид

$$W_{\theta X_1} = \frac{\theta(p)}{X_1(p)} = \frac{W_E W_O}{1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_O W_S}. \quad (5)$$

Обозначим знаменатель ПФ (5):

$$1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_O W_S = A(p).$$

ПФ участка с положительной обратной связью:

$$W_{X_1 X_2} = \frac{X_1(p)}{X_2(p)} = 1 + W_M W_{R1}. \quad (6)$$

ПФ модели в общем виде:

$$W_M = W_{O.N} W_E W_S W_{R3}. \quad (7)$$

С учетом этого

$$W_{X_1 X_2} = 1 + W_E W_{O.N} W_S W_{R3} W_{R1}. \quad (8)$$

Введем обозначение:

$$1 + W_E W_{O.N} W_S W_{R3} W_{R1} = A_1(p).$$

В номинальном режиме $A_1(p) = A(p)$ и ПФ прямой цепи имеет вид

$$W_{\theta X} = W_{R2} W_{X_1 X_2} W_{\theta X_1} = W_{R2} A_1(p) \frac{W_E W_O}{A(p)} = W_{R2} W_E W_O. \quad (9)$$

Как следует из приведенного выражения, при номинальном режиме наличие контура адаптации не влияет на работу САУ. При изменении значения коэффициента передачи и постоянной времени процесса теплообмена на выходе регулятора с ПФ W_{R1} (см. рис. 1) формируется сигнал, компенсирующий влияние этих изменений на динамику системы.

Из анализа представленных структур следует, что динамические характеристики двухконтурной САУ и системы с моделью будут эквивалентны, если обеспечено совпадение динамических характеристик звеньев внутренних замкнутых контуров обеих систем и во внешнем контуре двухконтурной системы ПФ эквивалентного регулятора выбрана в виде

$$W_{R0} = W_{R2} (1 + W_{R1} W_M). \quad (10)$$

Рекомендации по выбору рациональной структуры САУ зависят от особенностей конкретной системы. В частности, в рассматриваемом случае с позиций простоты реализации и настройки регуляторов предпочтительной является структура адаптивной системы с эталонной моделью.

Представляет интерес анализ возможности упрощения эталонной модели за счет отказа от учета инерционности электропривода и датчика обратной связи, т. е. приведения ПФ эталонной модели (3) к виду

$$W_M' = k_{O.N} k_E k_S. \quad (11)$$

Оценка потери качества управления при переходе к упрощенной эталонной модели проведена на основе моделирования динамических характеристик системы.

Количественные характеристики параметров рассматриваемой системы для конкретных условий работы УОГ получены в результате экспериментальных исследований [16, 17].

Значение постоянной времени T_E зависит от настроек частотно-регулируемого привода и составляет 5...10 с. Постоянная времени датчика T_S зависит от применяемого датчика и его настроек и составляет, как правило, 15...30 с.

При компьютерном моделировании САУ использовалась система относительных единиц. В относительных единицах принято значение $k_O k_E k_S = 1$. В качестве расчетного (эталонного) значения постоянной времени номинального ОУ принято $T_{O,N} = 120$ с. Это значение использовано в качестве базового для расчетов относительных значений постоянных времени других звеньев САУ. Постоянная времени ОУ в относительных единицах равна $T_O^* = 1$ о. е., датчика $T_S^* = 0,1$ о. е., электропривода $T_E^* = 0,05$ о. е., $T_{R3}^* = T_O^* = 1$ о. е.

В качестве регулятора с ПФ W_{R1} принят пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи $k_{R1} = 5$.

Во внешнем контуре системы использован интегральный регулятор с ПФ:

$$W_{R2} = \frac{1}{T_{R2}p}. \quad (12)$$

Его постоянная времени по результатам компьютерного эксперимента принята $T_{R2}^* = 0,6T_O^* = 0,6$ о. е.

ПФ полной модели по выражению (4) имеет вид

$$W_M = \frac{1}{0,005p^2 + 0,15p + 1}. \quad (13)$$

Исследованы динамические характеристики САУ с полной эталонной моделью (4) и упрощенной моделью (11). На рис. 3 приведены графики переходного процесса изменения температуры газа на выходе ОУ ($\Delta\theta$) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для системы с полной эталонной моделью W_M , при этом время t_p регулирования составляет 3,61 о. е.; кривая 2 – для системы с упрощенной моделью W_M' , в этом случае время регулирования – 3,74 о. е. Перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

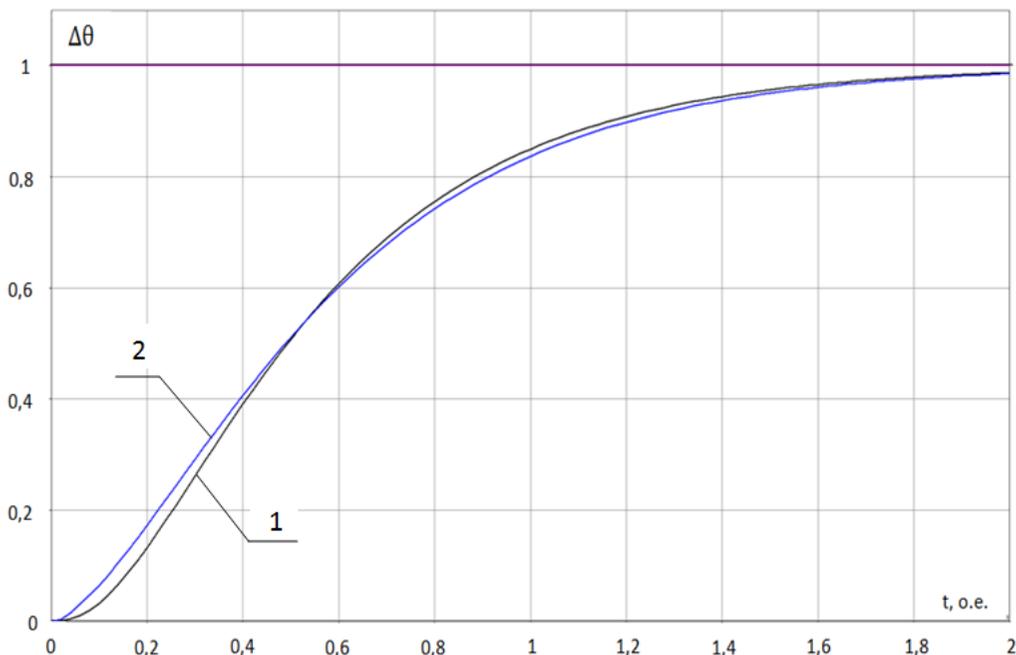


Рис. 3. Переходный процесс изменения температуры газа на выходе АВО при обработке задающего воздействия

На рис. 4 приведены графики переходного процесса изменения частоты вращения двигателей вентиляторов (Δf) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания температуры: кривая 1 – для системы с полной эталонной моделью W_M , при этом время t_p регулирования составляет 1,31 о.е.; кривая 2 – для системы с упрощенной моделью W_M' , в этом случае время регулирования – 1,64 о.е.; при этом перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

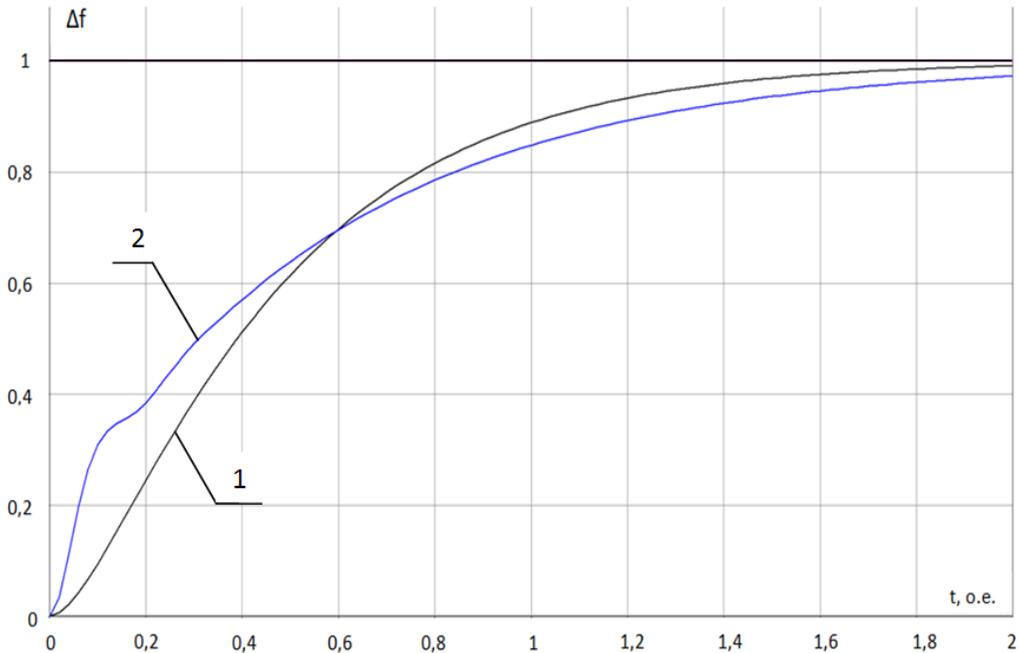


Рис. 4. Переходный процесс изменения частоты вращения электродвигателей вентиляторов при обработке задающего воздействия по температуре

Для оценки адаптивных свойств системы с упрощенной моделью W_M' на рис. 5 приведены графики переходного процесса изменения частоты вращения двигателей вентиляторов (Δf) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для $k_O = k_{O.N.}$, при этом время t_p регулирования составляет 1,64 о.е.; кривая 2 – для $k_O = 10k_{O.N.}$, в этом случае время регулирования – 1,41 о.е. Перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

Анализ приведенных кривых показывает, что использование в адаптивной системе упрощенной эталонной модели W_M' несущественно влияет на показатели качества переходных процессов по сравнению с использованием полной модели W_M и система с упрощенной моделью сохраняет адаптивные свойства.

Для оценки качества динамических характеристик систем широко используется понятие грубости (робастности) относительно некоторого свойства, присущего модели САУ. Это свойство называется грубым, если оно сохраняется при вариациях параметров модели САУ. В [15] предложено характеризовать грубость обеспечением запаса устойчивости при вариациях параметров звеньев САУ, в частности параметров ОУ.

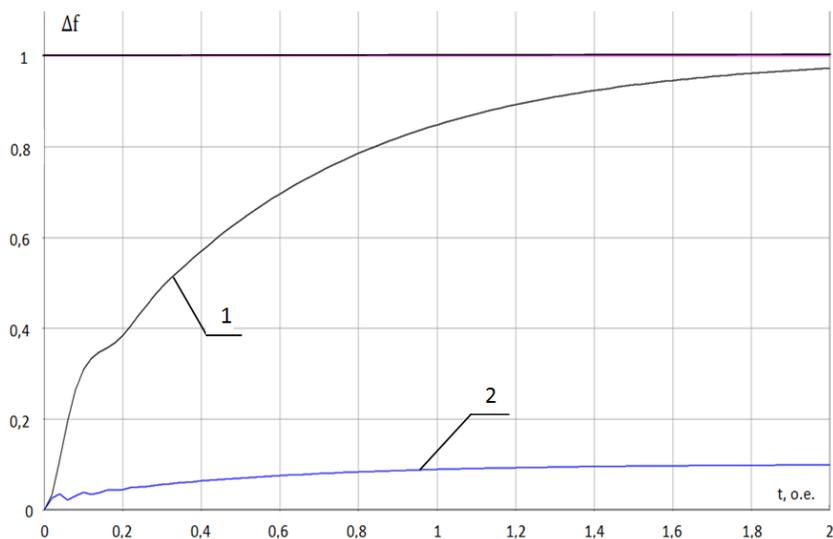


Рис. 5. Переходный процесс изменения частоты вращения электродвигателей вентиляторов при вариациях коэффициента передачи ОУ

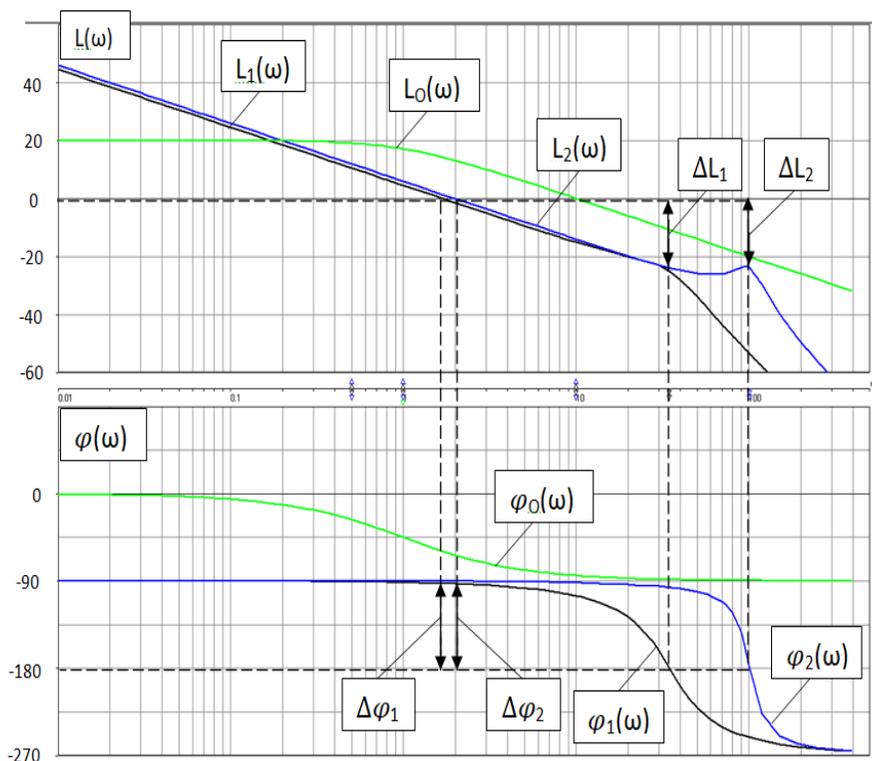


Рис. 6. ЛАХ и ЛФХ разомкнутой системы при изменении коэффициента передачи объекта управления в 10 раз:

$L_1(\omega)$, $\phi_1(\omega)$ – ЛАХ и ЛФХ номинальной системы; $L_2(\omega)$, $\phi_2(\omega)$ – ЛАХ и ЛФХ системы при возрастании коэффициента передачи объекта в 10 раз; $L_0(\omega)$, $\phi_0(\omega)$ – ЛАХ и ЛФХ варьированного объекта управления

Для рассматриваемой адаптивной системы на рис. 6 представлены логарифмические амплитудная (ЛАХ) и фазовая (ЛФХ) характеристики разомкнутой системы при изменении коэффициента передачи объекта управления в 10 раз.

Как следует из анализа приведенных характеристик, запас по фазе номинальной и варьированной системы $\Delta\varphi_1 \approx \Delta\varphi_2 \approx 90^\circ$. Запас по амплитуде номинальной и варьированной системы $\Delta L_1 \approx \Delta L_2 \approx 23$ дБ. Полученные результаты свидетельствуют о грубости системы по принятому показателю.

Выводы

Разработанная адаптивная САУ с эталонной моделью аппаратами воздушно-го охлаждения газа обладает робастными свойствами и обеспечивает требуемые показатели качества регулирования в условиях широкого диапазона изменения параметров объекта управления. Использование в САУ упрощенной эталонной модели вместо полной приводит к несущественным потерям качества управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кумар Б.К., Выгонюк П.И.* Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского нац. техн. ун-та им. К.И. Сатпаева. – 2011. – № 1 (83). – С. 67–71.
2. *Лапаев Д.Н., Мочалин Д.С., Титов В.Г.* Управление системой воздушного охлаждения газа компрессорных станций // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 79–83.
3. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А.* Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7. – С. 113–117.
4. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н.* Автоматическое управление температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 151–158.
5. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мигачев А.В.* Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 68–71.
6. *Абакумов А.М., Мигачев А.В.* Оценка энергетической эффективности использования системы автоматического управления температурой газа на компрессорных станциях // Сб. трудов Международной научно-практической конференции. Ашировские чтения. Т. II: Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. – Самара: СамГТУ, 2016. – С. 292–295.
7. *Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П.* Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 130–134.
8. *Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П.* Энергосбережение в установках охлаждения природного газа // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. Т. II: Достижения, проблемы и перспективы развития отрасли. – Альметьевск: Альметьевский гос. нефт. ин-т, 2016. – С. 61–63.
9. *Абакумов А.М. и др.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 110–113.
10. *Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А.* Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта нефти и газа. Кн. 1. – М.: Машиностроение-1, 2008. – 240 с.
11. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Крылов И.П.* Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
12. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского госу-

- дарственного технического университета. – 2011. – № 1 (54), вып. 3. – С. 25–32.
13. *Тарисов Р.Ш.* Адаптивная система управления электроприводом вентиляторов установок охлаждения газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.Ш. Тарисов. – Саратов, 2011. – 24 с.
 14. *Артюхов И.И., Тарисов Р.Ш.* Система управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов установки охлаждения газа с применением нечеткой логики // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5 (Электронный журнал). – URL: <http://www.science-education.ru/105-7149>
 15. Методы классической и современной теории автоматического управления: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
 16. *Мигачев А.В., Потемкин В.А., Степашкин И.П.* Параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления // Материалы VIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук». – Новосибирск: ООО «ЦРСНИ», 2016. – С. 23–28.
 17. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air-cooling unit // IEEE Xplore, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076297.
 18. *Терехов В.М., Осипов О.И.* Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 20 января 2018 г.

THE RESEARCH OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF NATURAL GAS AIR-COOLING UNITS

A.M. Abakumov, I.P. Stepashkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper presents the results of a study of the developed adaptive automatic control system for the natural gas air-cooling unit. A comparative analysis of the adaptive system with a reference model of the control object and a two-loop automatic control system is shown. The analysis of the possibility of simplifying the reference model by eliminating the inertia of the electric drive and the feedback sensor is examined. The dynamic characteristics of systems with a complete and simplified model are studied. Based on the results of the computer experiment, the robust properties of the adaptive control system were evaluated with a complete and simplified model. The curves of the transient processes of the adaptive system with a complete and simplified model are calculated with the variations in the parameters of the control object. The estimation of the stock of stability of systems at the variation of parameters of object of management is given.*

Keywords: *natural gas air cooling unit, adaptive automatic control system, robust properties estimation, dynamic system characteristics, adaptive system with reference model, system stability margin, control object parameter variations.*

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ivan P. Stepashkin, Postgraduate Student.*