

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКОНТУРНОЙ И АДАПТИВНОЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2018 А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов, И.П. Степашкин

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 07.06.2018

В работе приведены результаты исследования разработанной адаптивной системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа. Приведена структура адаптивной системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа. Выполнен сравнительный анализ динамических характеристик одноконтурной и адаптивной систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа. По результатам компьютерного эксперимента проведена оценка робастных свойств адаптивной системы управления. Рассчитаны кривые переходных процессов при вариациях параметров объекта управления. Проведен анализ чувствительности адаптивной и одноконтурной систем автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа.

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

Эффективным способом повышения энергетической эффективности установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов является переход от дискретного управления аппаратами воздушного охлаждения газа (АВО) к непрерывному с использованием частотно-регулируемого привода (ЧРП) вентиляторов [1 – 4].

Использование систем автоматического управления температурой газа на выходе установки снижает затраты электроэнергии на нужды охлаждения, а также позволяет повысить точность и надежность поддержания требуемых температурных режимов работы установок охлаждения газа (УОГ) [5 – 12].

В работах [13, 14] показано, что параметры объекта управления (ОУ) в рассматриваемых системах могут варьироваться в широких пределах, что определяет необходимость использования робастных систем управления.

Требуемое качество управления рассматриваемым ОУ может быть обеспечено использованием системы [17], выполненной в виде беспосредственной адаптивной системы управления с эталонной моделью [16 – 18]. Данная система

обеспечивает более стабильные динамические характеристики при вариациях параметров ОУ, чем стандартная одноконтурная система управления.

Структурная схема системы с эталонной моделью с учетом возмущающего воздействия представлена на рис. 1.

Динамические свойства отдельных элементов для приращения переменных отражены соответствующими передаточными функциями (ПФ) [19].

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

Передаточная функция W_o (объекта управления) отражает инерционность процесса теплообмена в теплообменнике АВО под воздействием создаваемого вентиляторами потока воздуха.

Выходной переменной процесса теплообмена является температура газа на выходе Θ , а входной – частота вращения вентиляторов f [7 – 9, 11]:

$$W_o = \frac{\Delta\theta}{\Delta f} = -\frac{k_o}{T_o p + 1}; \quad (1)$$

где k_o , T_o – коэффициент передачи и постоянная времени процесса теплообмена.

Передаточная функция частотно-регулируемого электропривода W_E вентиляторов и датчика температуры газа $W_s(p)$ имеют вид:

$$W_E = \frac{k_E}{T_E p + 1}; \quad (2)$$

Абакумов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

E-mail: abakumov-am@yandex.ru

Кузнецов Павел Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика». E-mail: kurnesov@mail.ru

Степашкин Иван Павлович, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование». E-mail: stepashkin163@mail.ru

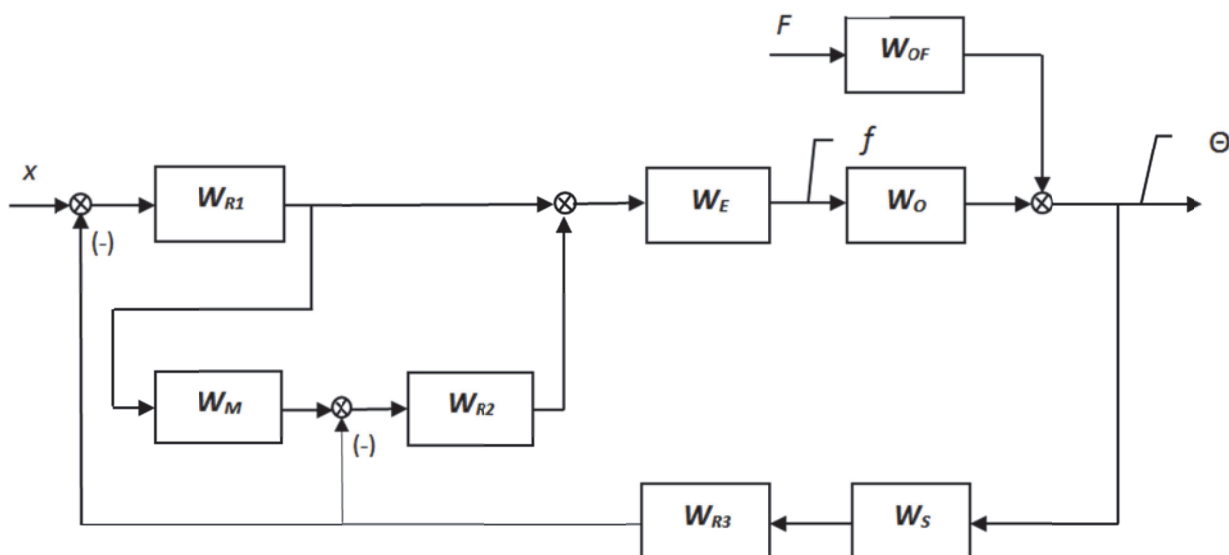


Рис. 1. Структурная схема системы с эталонной моделью с учетом возмущающего воздействия

$$W_S = \frac{k_S}{T_S p + 1}; \quad (3)$$

где k_E, k_S, T_E, T_S – коэффициенты передачи и постоянные времени частотно-регулируемого привода и датчика, соответственно.

Регулятор W_{R1} представляет собой интегральный И-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{R1} = \frac{1}{T_{R1} p}. \quad (4)$$

Постоянная времени T_{R1} интегрирующего преобразования И-регулятора выбрана по условию:

$$T_{R1} = 0,6 k_{O.N.} k_E k_S T_{O.N.}. \quad (5)$$

Динамические свойства пропорционального регулятора W_{R2} описываются коэффициентом передачи k_{R2} .

Динамические свойства ПД-регулятора описываются передаточной функцией:

$$W_{R3} = -(T_{R3} p + 1), \quad (6)$$

где T_{R3} – постоянная времени дифференцирующего преобразования.

Постоянная времени T_{R3} выбрана равной постоянной времени $T_{O.N.}$ номинального объекта:

$$T_{R3} = T_{O.}$$

ПФ эталонной модели принята в виде:

$$W_M = W_{R3} W_E W_{O.N.} W_S \quad (8)$$

где $W_{O.N.}$ – ПФ объекта с номинальными параметрами (номинального объекта).

Количественные характеристики системы управления температурой газа получены в результате экспериментальных исследований, проведенных на действующей установке охлаждения и описанных в [15] и [20].

Значение постоянной времени T_E составляет, как правило, 5...10 с. Постоянная времени

датчика T_S составляет 15 ... 30 с. Вариации данных значений зависят от применяемого оборудования и его настроек.

При компьютерном моделировании системы использовалась система относительных единиц (о.е.). В относительных единицах принято значение $k_o k_E k_S = 1$. В качестве расчетного (эталонного) значения постоянной времени процесса теплообмена в теплообменнике, принято: $W_{O.N.} = 120$ с. Это значение использовано в качестве базового для дальнейших расчетов относительных значений постоянных времени. Постоянная времени объекта управления в относительных единицах равна $T_o^* = 1$ о.е., датчика $T_S^* = 0,1$ о.е., электропривода $T_E^* = 0,05$ о.е. С учетом этого, $T_{R1}^* = 0,6 T_S^* = 0,6$ о.е., $T_{R3}^* = T_o^* = 1$ о.е. Коэффициент передачи k_{R3} пропорционального регулятора принят равным $k_{R3} = 5$.

В качестве наиболее неблагоприятного возмущающего воздействия на систему следует рассматривать изменение температуры на выходе УОГ при отключении/включении одного или нескольких АВО.

Структура стандартной одноконтурной замкнутой системы не содержит элементов адаптации (ПФ звеньев $W_{R1}(p) = 0, W_M(p) = 0$) и ее ПФ относительно возмущающего воздействия F может быть представлена в виде:

$$W_{c1}^{\theta F} = \frac{W_o^F}{1 + W_{op1}}, \quad (9)$$

где W_{op1} – ПФ одноконтурной системы в разомкнутом состоянии:

$$W_{op1} = W_{R2} W_E W_O W_S W_{R3}. \quad (10)$$

На основе структурной схемы, выражение для ПФ замкнутой адаптивной системы относительно возмущающего воздействия F получено в виде:

$$W_{c2}^{\theta F} = \frac{W_o^F}{1 + W_{op1} + W_{op1}W_MW_{R1} + W_{op}^{BK'}} \quad (11)$$

где W_{op}^{BK} – ПФ внутреннего контура в разомкнутом состоянии:

$$W_{op}^{BK} = W_EW_OW_SW_{R3}W_{R1}. \quad (12)$$

Сравнительный анализ выражений (9), (11) показывает, что в рассматриваемой адаптивной системе возмущающее воздействие подавляется более эффективно благодаря увеличению знаменателя выражения (11) в представляющем интерес диапазоне комплексной частоты за счет третьего и четвертого слагаемых. Причем эффективность подавления возмущения повышается с увеличением модуля W_{R1} .

Для количественной оценки показателей качества переходного процесса при действии возмущающего воздействия на рис. 2 показан переходный процесс для отклонения температуры на выходе установки охлаждения (УОГ): кривая 1 – для номинальных параметров ОУ, кривая 2 – при возрастании коэффициента передачи ОУ в 10 раз. На рис. 3 представлены кривые изменения частоты вращения вентиляторов для рассматриваемого переходного процесса. При этом время t_p регулирования составляет 4,73 о.е при номинальных параметрах ОУ (кривая 1) и 4,62 о.е., при возрастании коэффициента передачи ОУ в 10 раз (кривая 2). При этом перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

Процессы рассчитаны в относительных единицах, за базовое значение изменения температуры принято изменение температуры $\Delta\theta_{op}$ на выходе УОГ при отключении m АВО в разомкнутой системе. При допущении об аналогичности характеристик АВО и равномерности распределения газа по параллельно включенным аппаратам приращение температуры:

$$\Delta\theta_{op} = \frac{m}{n} \Delta\theta_{op1}, \quad (13)$$

где θ_{op1} , – температурный перепад, создаваемый каждым АВО;

n – общее количество параллельно включенных АВО.

Так например, для типичных условий: $n = 12$, при некотором режиме работы $\Delta\theta_{op1} = 12$ °С. Тогда при отключении одного АВО в соответствии с выражением (13) $\Delta\theta_{op} = 1$ °С. Максимальный динамический «выброс» температуры по рис. 2 в замкнутой системе для номинального объекта составляет примерно 0,03 относительных единиц. Тогда в именованных единицах динамический выброс температуры в замкнутой САУ составит $\Delta\theta_c = 0,03\Delta\theta_{op} = 0,03$ °С.

Для оценки чувствительности системы к вариациям параметров объекта управления W_o используется функция чувствительности [21]:

$$V_{W_o}^{W_{\theta x}} = \frac{\partial W_{\theta x}}{\partial W_o}, \quad (14)$$

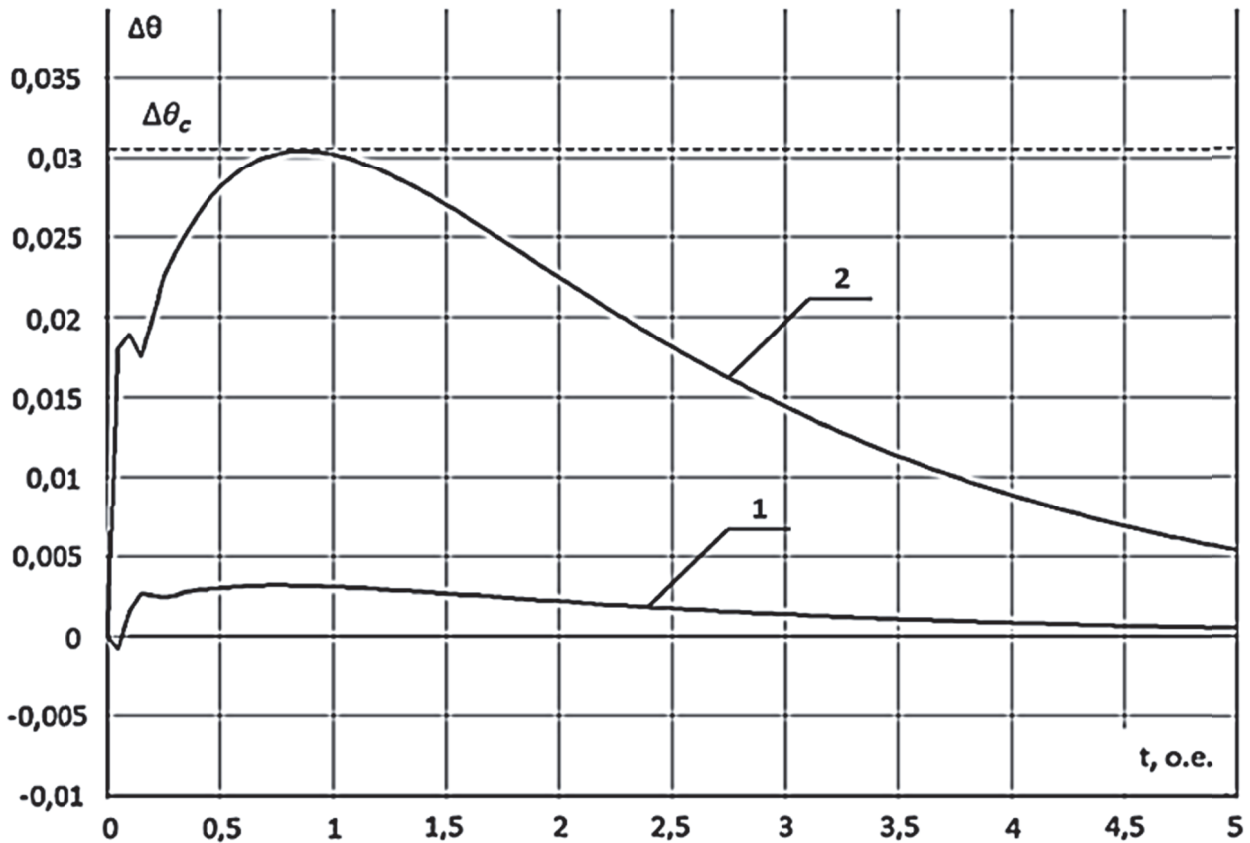


Рис. 2. Графики переходных процессов изменения температуры при возмущающем воздействии

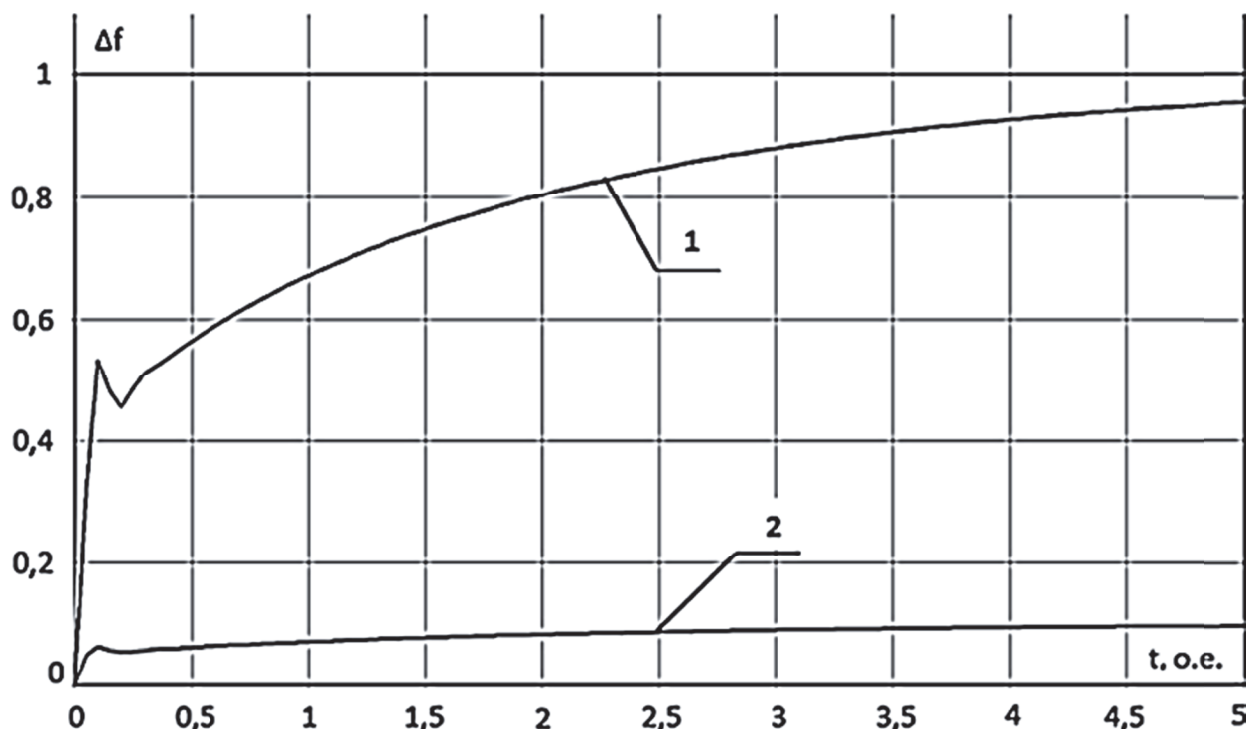


Рис. 3. Графики переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов при возмущающем воздействии

где $W_{\theta x}$ – ПФ замкнутой системы для выходной переменной θ и входной – x .

ПФ эталонной модели принята в виде:

$$W_M = W_{R3} W_E W_{O.N} W_S, \quad (15)$$

где $W_{O.N}$ – ПФ объекта с номинальными параметрами (номинального объекта).

ПФ замкнутой системы после преобразований приведена к виду:

$$W_{\theta x} = \frac{W_{R2} W_E W_O (1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_O W_S)}{W_{R2} W_{R3} W_E W_O W_S (1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_{O.N} W_S)} \quad (16)$$

С учетом соотношения (14) выражение для функции чувствительности после преобразований получено в виде:

$$V_{W_O}^{W_{\theta x}} = \frac{W_{R2} W_E (1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_{O.N} W_S)}{[W_{R2} W_{R3} W_E W_O W_S (1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_{O.N} W_S)]^2} \quad (17)$$

На основании полученного выражения для функции чувствительности может быть найдена чувствительность $S_{W_O}^{W_{\theta x}}$ замкнутой системы, которая представляет собой отношение относительных изменений ПФ замкнутой системы и ПФ объекта управления [22] при «малых» отклонениях. Чувствительность определяется с учетом функции чувствительности по выражению:

$$S_{W_O}^{W_{\theta x}} = V_{W_O}^{W_{\theta x}} \frac{W_O}{W_{\theta x}} \quad (18)$$

После преобразований выражение для чувствительности адаптивной системы с эталонной моделью получено в виде:

$$S_{W_O}^{W_{\theta x}} = \frac{1}{1 + W_{\theta x}^{op} + W_{\theta x1n}^{op} (1 + \frac{W_O}{W_{O.N}})} \quad (19)$$

где $W_{\theta x}^{op}$ – ПФ одноконтурной системы (без контура адаптации) в разомкнутом состоянии:

$$W_{\theta x}^{op} = W_{R2} W_{R3} W_E W_O W_S, \quad (20)$$

$W_{\theta x1n}^{op}$ – ПФ внутреннего замкнутого контура системы в разомкнутом состоянии для эталонного объекта:

$$W_{\theta x1n}^{op} = W_{R1} W_{R3} W_E W_{O.N} W_S \quad (21)$$

Дополнительно получено соотношение для чувствительности одноконтурной системы:

$$S_{W_O}^{W_{\theta x}} = \frac{1}{1 + W_{\theta x}^{op}} \quad (22)$$

Сравнительный анализ соотношений (18) и (22) показывает, что чувствительность адаптивной системы с эталонной моделью меньше, чем одноконтурной системы за счет третьего слагаемого в знаменателе выражения (19). Причем, чувствительность адаптивной системы снижается при увеличении модуля ПФ $W_{\theta x1n}^{op}$ внутреннего замкнутого контура в разомкнутом состоянии.

На рис. 4 для адаптивной САУ приведены графики переходного процесса изменения температуры газа на выходе объекта управления (теплообменника) ($\Delta\theta$) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для $k_{O.N}$, при этом время t_p регулирования составляет 3,61 о.е.; кривая 2 – для $k_o = 10 k_{O.N}$, в этом случае время регулирования – 3,48 о.е; при этом перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

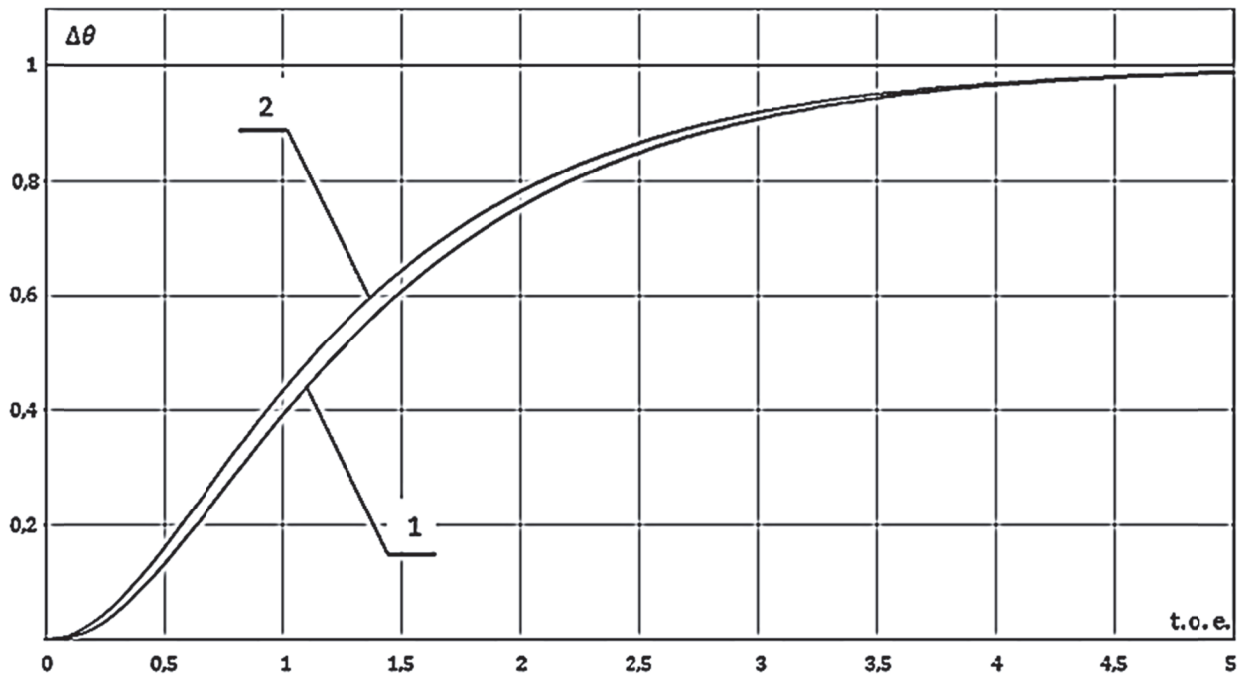


Рис. 4. Переходный процесс по температуре газа на выходе АВО при ступенчатом изменении сигнала задания

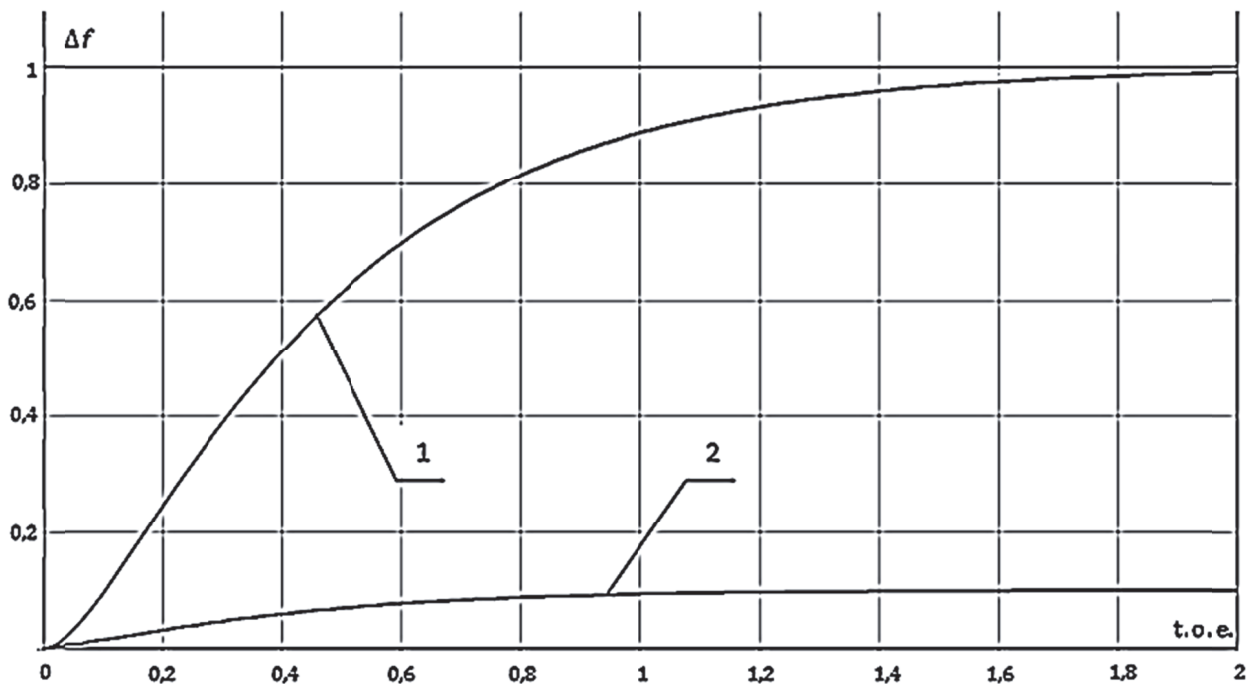


Рис. 5. Переходный процесс для частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала задания

На рис. 5 адаптивной САУ приведены графики переходного процесса изменения частоты f вращения двигателей вентиляторов (Δf) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для k_{ON} , при этом время t_p регулирования составляет 1,31 о.е.; кривая 2 – для $k_o = 10k_{ON}$, в этом случае время регулирования – 1,09 о.е., при этом перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

Приведенные результаты свидетельствуют

о высоком качестве стабилизации температуры в адаптивной системе в условиях вариаций параметров ОУ. При этом обеспечивается также требуемое качество переходных процессов изменения частоты вращения вентиляторов. Анализ показывает, что адаптивная САУ, по сравнению с одноконтурной, обеспечивает более эффективное подавление возмущающего воздействия и обладает меньшей чувствительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов / А.М.Абакумов, С.В.Алимов, Л.А.Мигачева, В.Н.Мосин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. №3. С. 110 - 113.
2. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта нефти и газа / Г.Р.Шварц, А.М.Абакумов, Л.А.Мигачева, Ф.Н.Рассказов, П.К.Кузнецов // Книга 1. М.: Машиностроение-1, 2008. 240 с.
3. Артюхов И.И. Аршалян И.И., Крылов И.П. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. №1. С. 33 – 36.
4. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И.И.Артюхов, И.И.Аршалян, Р.Ш.Тарисов, А.А.Тримбач, Е.В.Устинов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. 2011. №1 (54). Вып. 3. С. 25 – 32.
5. Кумар Б.К., Выгонюк П.И. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И.Сатнаева. 2011. №1 (83). С. 67 – 71.
6. Лапаев Д.Н., Мочалин Д.С., Титов В.Г. Управление системой воздушного охлаждения газа компрессорных станций // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е.Алексеева. 2014. №5 (107). С. 79 – 83.
7. Абакумов А.М, Алимов С.В., Мигачева Л.А. Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». 2010. №7. С. 113 – 117.
8. Автоматическое управление температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения/ А.М.Абакумов, С.В.Алимов, Л.А.Мигачева, В.Н.Мосин // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». 2011. №1. С. 151 - 158.
9. Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения / А.М.Абакумов, С.В.Алимов, Л.А.Мигачева, А.В.Мигачев // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №5. С. 68 - 71.
10. Оценка энергетической эффективности использования системы автоматического управления температурой газа на компрессорных станциях / А. М. Абакумов, А. В. Мигачев, В.А.Потемкин, И.П. Степашкин // Сб. трудов Международной научно-практической конференции. Ашировские чтения. Т. II : Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. Самара: Самарский Гос. технический ун-т, 2016. С. 292 – 295.
11. 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.
12. 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. нефтяной институт, 2016. С. 61 – 63.
13. Тарисов Р.Ш. Адаптивная система управления электроприводом вентиляторов установок охлаждения газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 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.
15. 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
16. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат. 1984. 216 с.
17. Солодовников В.В., Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. М.: Машиностроение. 1972. 270 с.
18. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр «Академия». 2005. 304 с.
19. Методы классической и современной теории автоматического управления: Синтез регуляторов систем автоматического управления [под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова]. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2004. 616 с.
20. 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.
21. Томович Р, Вукобратович М. Общая теория чувствительности. М.: Советское Радио. 1972. 240 с.
22. Ишматов З. Ш., Волков М.А., Гурентьев Е.А. Анализ чувствительности робастных систем автоматического управления // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», [г. Екатеринбург], 05-09 октября 2015 г. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 95-98.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SINGLE-LOOP
AND ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF NATURAL GAS AIR-COOLING UNITS**

© 2018 A.M. Abakumov, P.K. Kuznetsov, I.P. Stepashkin

Samara State Technical University

The paper presents the results of a study of the developed adaptive automatic control system for the natural gas air-cooling unit. The structure of the adaptive system of automatic control of the natural gas air-cooling unit is given. A comparative analysis of the dynamic characteristics of a single-loop and adaptive automatic control systems for the natural gas air-cooling unit has been performed. Based on the results of the computer experiment, the robust properties of the adaptive control system were evaluated. The curves of transient processes are calculated for variations in the parameters of the control object. The sensitivity analysis of the adaptive and single-loop automatic control systems for the natural gas air-cooling unit has been carried out.

Keywords: natural gas air-cooling unit, adaptive automatic control system, robust properties estimation, dynamic system characteristics, adaptive system with reference model, disturbing effect, variations in control objects parameters.

Alexander Abakumov, Doctor of Technics, Professor at the Electromechanics and Automotive Electrical Equipment Department. E-mail: abakumov-am@yandex.ru

Pavel Kuznetsov, Doctor of Technics, Professor at the Electric Drive and Industrial Automation Department.

E-mail: kurnesov@mail.ru

Ivan Stepashkin, Postgraduate Student at the Electromechanics and Automotive Electrical Equipment Department.

E-mail: stepashkin163@mail.ru