УДК 681.518

А.С. КУЦЕНКО, д-р. техн. наук, ***Чан Занг ЛЮ, С.В. КОНОХОВ***

КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СГОРАНИЯ В КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

Запропоновано квазістатичну балансову математичну модель процесу згоряння паливоповітряної суміші у котельному агрегаті. Розглянуто задачу синтезу автоматизованої системи стабілізації термодинамічних параметрів, які забезпечують найкращі економічні та екологічні показники котельних агрегатів. Аналізується якість перехідних процесів в залежності від структури системи управління.

Введение. Настоящий период развития теплоэнергетики обусловлен двумя основными факторами, связанными со значительным ростом потребностей общества в тепловой и электрической энергии. Во-первых, это повышение цен на основные энергоносители (нефть, природный газ). Во-вторых, высокий уровень загрязнения окружающей среды выбросами продуктов сгорания теплоэнергетических комплексов в атмосферу. Перечисленные факторы ставят перед теплоэнергетиками множество проблем по совершенствованию технологических процессов, прежде всего, котельных агрегатов (КА), в которых происходят основные процессы преобразования химической энергии топливовоздушной смеси в тепловую энергию рабочего вещества.

Основу рационального проведения технологического процесса КА наряду с совершенной организацией теплообмена между дымовыми газами и рабочим веществом составляет оптимальное управление процессом сгорания топливовоздушной смеси, заключающееся в поддержании необходимых количественных и качественных характеристик последней, а также в стабилизации рациональных термодинамических параметров дымовых газов в топке КА. Эти процессы достаточно подробно рассмотрены в классической литературе [1-3]. Основным подходом к организации процесса управления КА следует считать подход, основанный на одномерных процессах управления топливо и воздухоподачей, а также отводом дымовых газов. Такой подход не требует детальной информации о математической модели процессов в КА и базируется на классической теории скалярного управления. При этом управляющие воздействия по каждому из сепаратных контуров управления являются возмущающими по отношению к другим каналам управления. Таким образом, систему управления КА следует отнести к классу многосвязных.

Более поздние работы [4-6] направлены в основном на управление процессом сгорания по поддержанию оптимального значения коэффициента избытка воздуха, главной характеристики качества сгорания.

Методы современной теории управления позволяют обеспечить высокое качество многомерных управляемых процессов в условиях различных возмущающих воздействий. Их эффективное применение возможно только при наличии адекватной математической модели объекта управления. В ряде работ [6, 7] сделаны попытки синтеза систем управления на основе применения микропроцессорной техники на базе математических моделей. Однако там же отмечено, что сложность процессов в КА не дает гарантий адекватности динамических моделей реальным процессам. В то же время стационарная математическая модель дает достаточно точные для практики результаты.

Постановка задачи. Как было отмечено во введении, построение математической модели рабочего процесса в КА, состоящей из моделей процесса сгорания и теплообмена в наиболее полном виде представляет собой весьма сложную задачу математической физики, а ее численная реализация на ЭВМ также вызывает затруднения в связи с необходимостью интегрирования системы дифференциальных уравнений в частных производных. Замена же распределенной системы на систему с сосредоточенными параметрами приводит к значительным неопределенностям в назначении параметров таких систем (постоянных времени, коэффициентов теплообмена между элементами и др.). В то же время балансовая модель КА, основанная на фундаментальных физических законах сохранения, является достаточно адекватной реальным процессам при условии того, что возмущающие и управляющие воздействия достаточно «медленные». Такие процессы в классической термодинамике получили наименование квазистатических.

В настоящей работе предлагается метод синтеза системы управления КА на основе современной теории управления многосвязными системами, основанный на квазистатической балансовой модели процесса сгорания.

Основные положения теории управления квазистатическими процессами. В работах [8, 9] показано, что при определенных условиях на воздействующие факторы, процесс в устойчивой динамической системе с высокой степенью точности можно рассматривать как последовательность состояний равновесия, а, следовательно, как квазистатический процесс. Математическую модель такого процесса в наиболее общем виде можно представить в виде системы дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x} = \Phi(x)u\,,\ x \in R^n\,,\ u \in R^m\,, \tag{1}$$

где x - вектор состояния, u - вектор воздействий, $\Phi(x)$ - матрица-функция соответствующей размерности.

Условием равновесия системы (1) в некоторой точке фазового пространства $x^* \in R^n$, является выполнение условия

$$\Phi(x^*)u = 0\,. \tag{2}$$

Система линейных уравнений (2), как известно из линейной алгебры, всегда имеет тривиальное решение $u = 0$. Условием существования нетривиальных решений (2) является условие

$$rank\Phi(x^*) = r < m\,. \tag{3}$$

В этом случае множество нетривиальных решений (2) имеет структуру линейного подпространства $U^s \subset R^n$ размерность которого $s = m - r$:

$$u^* = \sum_{i=1}^{s} c_i u^i \in U^s, \tag{4}$$

где $\left(u^1, u^2, \ldots, u^s\right)$ - некоторый базис подпространства U^s, а $\left(c_1, c_2, \ldots, c_s\right)$ - произвольные постоянные. Таким образом, условие (3) является необходимым и достаточным условием равновесия при $u \neq 0$. Такое равновесие можно назвать динамическим.

Условие (3) выделяет в пространстве состояний подмножество X^*, которому принадлежат все точки, удовлетворяющие (3):

$$X^* = \left\{x^* \middle| rank\Phi\left(x^*\right) < m\right\}.$$

В случае $m = n$, т.е. квадратной матрицы $\Phi(x)$, условие (3) эквивалентно условию

$$\det \Phi\left(x^*\right) = 0, \tag{5}$$

определяющему некоторую гиперповерхность в R^n.

Для исследования устойчивости некоторого положения равновесия, задаваемого парой $\left(x^*, u^*\right)$, линеаризуем (1) относительно $\left(x^*, u^*\right)$. В результате получим:

$$\Delta\dot{x} = \sum_{k=1}^{m} u_k^* A_k\left(x^*\right)\Delta x + \Phi\left(x^*\right)\Delta u, \tag{6}$$

где Δx и Δu - векторы малых отклонений от положения равновесия, а матрицы $A_k\left(x^*\right) = \left.\frac{\partial \varphi_k(x)}{\partial x}\right|_{x=x^*}$, $\left(k = \overline{1, m}\right)$, где $\varphi_k(x)$ - k-й столбец матрицы $\Phi(x)$.

В случае тривиального положения равновесия, т.е. при $u^* = 0$ соотношение (6) принимает исключительно простой вид

$$\Delta\dot{x} = \Phi\left(x^*\right)\Delta u.$$

В случае же динамического равновесия при $u^* \neq 0$ исследование устойчивости квазистатической системы сводится к исследованию устойчивости однородной линейной системы

$$\Delta\dot{x} = \left(\sum_{k=1}^{m} u_k^* A_k\left(x^*\right)\right)\Delta x = A\left(x^*, u*\right)\Delta x. \tag{7}$$

Стабилизация состояния динамического равновесия. При динамическом равновесии в точке $\left(x^*, u^*\right)$ может оказаться, что система первого приближения (6) неустойчива. Таким образом, возникает постановка задачи синтеза системы стабилизации некоторого положения равновесия путем введения линейной обратной связи по отклонениям:

$$\Delta u = K\Delta x\,, \tag{8}$$

где K - матричный коэффициент усиления.

Структурная схема системы стабилизации заданного положения равновесия $\left(x^*, u^*\right)$ представлена на рис.1

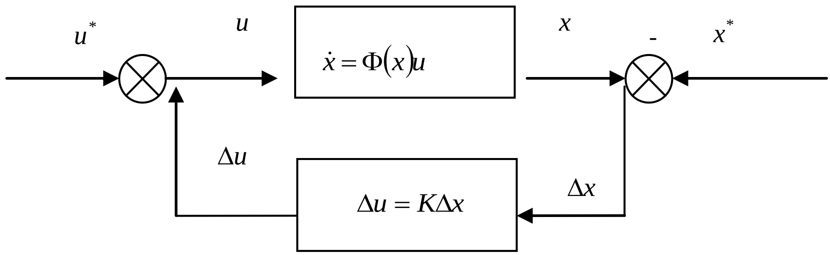


Рис. 1 – Структурная схема системы стабилизации ненулевого положения равновесия

Нетрудно видеть, что система первого приближения, соответствующая рис. 1, с учетом (4) и (8) запишется как

$$\Delta\dot{x} = \left(A\left(x^*, u^*\right) + \Phi\left(x^*\right)K\right)\Delta x\,. \tag{9}$$

Выбор матрицы K удобно осуществить на основе решения вспомогательной линейно-квадратичной задачи оптимального управления. Для этого зададимся квадратичным критерием качества:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty \left(\Delta x^T Q \Delta x + \Delta u^T R \Delta u\right)dt\,, \tag{10}$$

где Q и R - сильвестровы симметрические весовые матрицы. Тогда матричный коэффициент усиления K, гарантирующий устойчивость замкнутой системы, находится в виде

$$K = -R^{-1}\Phi^T\left(x^*\right)P\,, \tag{11}$$

где x^* - решение матричного алгебраического уравнения

$$A^T\left(x^*, u^*\right)P + PA\left(x^*, u^*\right) - P\Phi\left(x^*\right)R^{-1}\Phi^T\left(x*\right)P + Q = 0\,. \tag{12}$$

Другим подходом к решению задачи стабилизации положения динамического равновесия является включение в контур регулирования интегрирующих элементов [10]. Такой подход связан так же и с тем обстоятельством, что управления u во многих случаях технически реализуются исполнительными устройствами интегрирующего типа. В этом случае систему дифференциальных уравнений объекта (1) необходимо дополнить m дифференциальными уравнениями интегрирующих элементов

$$\dot{u} = \delta, \quad \delta \in R^m, \tag{13}$$

где δ - вектор скорости изменения вектора управления u, представляющий по сути новое управление $(m+n)$ - мерной системой (1), (13). Структурная схеме такой системы стабилизации представлена на рис. 2

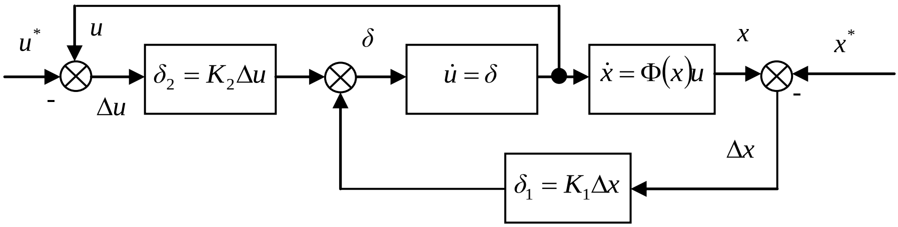


Рис. 2 – Структурная схема системы стабилизации динамического положения равновесия с интегрирующим регулятором

Приведенная на рис. 2 структурная схема полностью аналогична структурной схеме рис. 1. Матричный коэффициент усиления $K = (K_1 \mid K_2)$ в цепи обратной связи можно найти в результате решения вспомогательной линейно-квадратичной задачи оптимального управления для линеаризованной расширенной системы (1), (13):

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x} &= A(x^*, u^*)\Delta x + \Phi(x^*)\Delta u, \\ \Delta\dot{u} &= \delta. \end{aligned} \tag{14}$$

Соответствующие уравнения замкнутой системы относительно отклонений от положения равновесия примут вид

$$\Delta\dot{x} = A(x^*, u^*)\Delta x + \Phi(x^*)\Delta u, \tag{15а}$$

$$\Delta\dot{u} = K_1 \Delta x + K_2 \Delta u. \tag{15в}$$

Следует отметить, что системы (9) и (14) имеют место при точном выполнении условия равновесия (2). Если это условие не выполнено, то в этом случае в правой части (9) и (15а) появится дополнительное постоянное слагаемое $\Phi(x)u \neq 0$. В связи с этим, установившиеся значения Δu и Δx уже будут отличны от нуля. Т.е. в системе установится новое устойчивое положение равновесия, отличное от (x^*, u^*).

Математическая модель процесса в сгорания КА. Рассмотрим балансовую модель процесса сгорания в КА, основанную на законах сохранения энергии и вещества. Основными допущениями при выводе дифференциальных уравнений квазистатического процесса являются:

- топливо, воздух и продукты сгорания предполагаются идеальными газами;
- точка КА рассматривается как термодинамическая система с сосредоточенными параметрами;
- коэффициент полезного действия КА является величиной постоянной;
- тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы в сравнении с тепловой мощностью КА;
- диссоциация продуктов сгорания не учитывается;
- механический и химический недожоги топлива пренебрежительно малы;
- температуры воздуха и топлива поддерживаются постоянными.

Структурная схема КА показана на рис. 3.

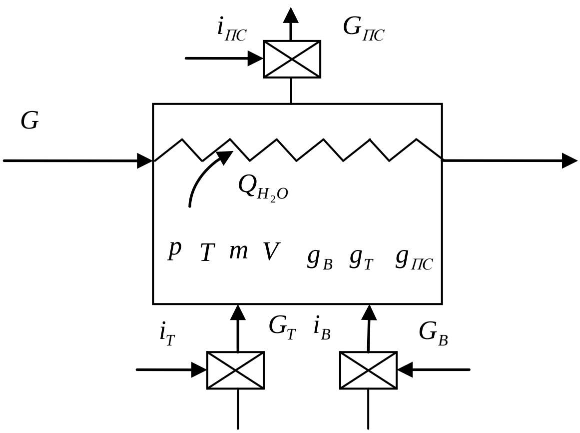


Рис. 3 - Основные компоненты энергетического и материального балансов КА

$G_T, G_B, G_{ПС}, G$ - расходы топлива, воздуха, продуктов сгорания и воды;

$i_T, i_B, i_{ПС}$ - энтальпии топлива, воздуха, продуктов сгорания;

P, T, m, V - давление, температура, масса и объем продуктов сгорания в КА;

$g_B, g_T, g_{ПС}$ - массовые доли воздуха, топлива и чистых продуктов сгорания в топке КА.

Q_{H_2O} - интенсивность подвода теплоты к рабочему веществу.

Исходя из закона сохранения энергии и принятых допущений дифференциальное уравнение энергетического баланса для КА примет вид

$$\frac{dU}{dt} = i_T G_T + i_B G_B - i_{ПС} G_{ПС} + Q - Q_{H_2O}, \tag{16}$$

где U - внутренняя энергия КА, Q - теплота сгорания топливовоздушной смеси.

Дифференциальное уравнение массового баланса запишется как

$$\frac{dm}{dt} = G_T + G_B + G_{ПС}. \tag{17}$$

Уравнение баланса топливовоздушной смеси представим как

$$m\frac{dg}{dt} = -gG_T + (1-g)G_B,$$

где g - кажущаяся массовая доля воздуха в топке КА, т.е. при отсутствии реакции сгорания смеси.

Величина g связана с основным параметром, определяющим качество процесса сгорания и КПД КА, коэффициентом избытка воздуха α соотношением

$$g = \frac{\alpha L_0}{\alpha L_0 + 1}, \tag{18}$$

где L_0 - стехиометрическое отношение, представляющие собой количество воздуха, необходимое для сжигания единицы массы топлива и являющееся индивидуальной характеристикой конкретного вида топлива. Для природного газа $L_0 = 17{,}4$, а оптимальная величина $\alpha \approx 1{,}1$.

Уравнение (16) можно преобразовать с учетом известных взаимосвязей между температурой внутренней энергии и энтальпией для идеальных газов к виду

$$mc_V\frac{dT}{dt} + c_V T\frac{dm}{dt} = (i_T + h - \eta h)G_T + i_B G_B - c_p T G_{ПС}, \tag{19}$$

где h - низшая теплотворная способность топлива, η - коэффициент полезного действия КА, c_V и c_p - изохорная и изобарная теплоемкости продуктов сгорания.

Окончательно уравнение (19) с учетом (17) можно записать в виде

$$m\frac{dT}{dt} = (A - T)G_T + (B - T)G_B + (1-\gamma)TG_{ПС}, \tag{19}$$

где A и B некоторые постоянные, зависящие от состава топлива и температуры окружающей среды, γ - показатель адиабаты продуктов сгорания.

Окончательно система балансовых уравнений процесса сгорания примет вид

$$\begin{aligned}
&\frac{dT}{dt}=\frac{A-T}{m}G_T+\frac{B-T}{m}G_B+\frac{(1-\gamma)T}{m}G_{ПС},\\
&\frac{dg}{dt}=-\frac{g}{m}G_T+\frac{1-g}{m}G_B,\\
&\frac{dm}{dt}=G_T+G_B-G_{ПС}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Как видно из (20) полученная система дифференциальных уравнений имеет структуру (1), т.е. представляет собой квазистатическую систему третьего порядка с 3 управлениями - G_T, G_B и $G_{ПС}$. В соответствии с результатами, полученными ранее такая система может иметь ненулевые положения равновесия. Условия динамического равновесия найдем приравняв нулю правые части 2-го и 3-го уравнений (20). В результате получим

$$\begin{pmatrix} G_T \\ G_B \\ G_{ПС} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 \\ \dfrac{g}{1-g} \\ \dfrac{1}{1-g} \end{pmatrix}c, \tag{21}$$

где c - произвольная постоянная, эквивалентная задаваемой тепловой мощности КА, поскольку $c=G_T$.

Условие вырожденности матрицы $\Phi(x)$ для (20) получим, приравнивая нулю правую часть первого из уравнений системы (20) с учетом (21). В результате после несложных преобразований получим требуемую связь между равновесными параметрами процесса в виде

$$A(1-g)+Bg=\gamma T. \tag{22}$$

Анализируя условие (22), можно сделать вывод о том, что задание отношения топливо-воздух, определяемого величиной g, однозначно определяет температуру продуктов сгорания. При этом масса продуктов сгорания в топке КА может быть произвольной и выбираться в соответствии с требуемой величиной давления в точке КА

$$m=\frac{pV}{RT}, \tag{23}$$

где R - газовая постоянная, продуктов сгорания.

Таким образом, все переменные состояния доступны прямому или косвенному измерению. Коэффициент избытка воздуха α контролируется датчиками O_2 и CO_2 на выходе из КА, температура и давление в КА соответствующими датчиками в топке. Величина g определяется исходя из (18), а m в соответствии с (23).

Исследуем устойчивость квазистатической системы (20). Для этого в положении равновесия, определенном в силу (18), (21), (22), (23) тремя параметрами G_T, α, p, построим в соответствии с (6) систему уравнений первого приближения. В результате получим:

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{T} \\ \Delta\dot{g} \\ \Delta\dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\gamma}{m(1-g)}G_T & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m}G_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta g \\ \Delta m \end{pmatrix} + \qquad (24)$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{A-T}{m} & \frac{B-T}{m} & \frac{(1-\gamma)T}{m} \\ -\frac{g}{m} & \frac{1-g}{m} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta G_T \\ \Delta G_B \\ \Delta G_{ПС} \end{pmatrix}$$

Анализ свободных движений системы 1-го приближения (24) показывает, что последняя распадается, и может быть описана тремя независимыми дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} &\Delta\dot{T} = -\frac{\gamma}{m(1-g)}G_T\Delta T, \\ &\Delta\dot{g} = -\frac{1}{m}G_T\Delta g, \\ &\Delta\dot{m} = 0. \end{aligned} \qquad (25)$$

Первые два уравнения (25) определяют апериодически устойчивые переходные процессы в связи с отрицательностью показателя экспоненты при любых физически обоснованных величинах параметров, входящих в правые части (25). Последнее же уравнение соответствует состоянию безразличного равновесия по координате Δm. Таким образом, система (24) неустойчива.

Введем относительные безразмерные координаты;

$$\overline{\Delta T} \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta T}{T}; \quad \overline{\Delta g} \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta g}{g}; \quad \overline{\Delta m} = \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta m}{m}; \quad \overline{\Delta G_T} = \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta G_T}{G_T};$$

$$\overline{\Delta G_B} = \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta G_B}{G_B}; \quad \overline{\Delta G_{ПС}} = \overset{\Delta}{=} \frac{\Delta G_{ПС}}{G_{ПС}}.$$

В относительных координатах система (24) преобразуется к виду

$$\begin{pmatrix} \frac{d\overline{\Delta T}}{d\tau} \\ \frac{d\overline{\Delta g}}{d\tau} \\ \frac{d\overline{\Delta m}}{d\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\gamma}{1-g} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta T} \\ \overline{\Delta g} \\ \overline{\Delta m} \end{pmatrix} + \qquad (26)$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{v\gamma}{g+v(1-g)}-1 & \left(\frac{\gamma}{g+v(1-g)}-1\right)\frac{g}{1-g} & \frac{1-\gamma}{1-g} \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{g}{1-g} & -\frac{1}{1-g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta G_T} \\ \overline{\Delta G_B} \\ \overline{\Delta G_{ПС}} \end{pmatrix},$$

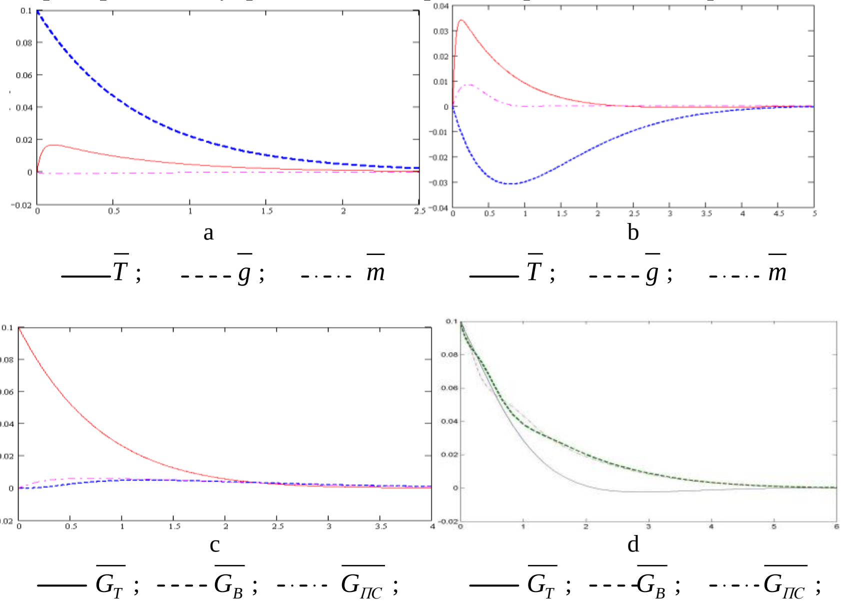
где $v = \dfrac{A}{B}$, $\tau = \dfrac{G_T}{m} t$ - безразмерное время.

Синтез системы стабилизации процесса сгорания КА. Рассмотрены следующие структурные схемы систем обеспечения устойчивости КА.

1. Система с пропорциональным регулятором (структурная схема рис. 1).
2. Система с интегрирующим регулятором (структурная схема рис. 2).
3. Система с интегрирующим регулятором и наблюдателем вектора относительных расходов по координатам $\overline{\Delta T}, \overline{\Delta g}$ и $\overline{\Delta m}$.

Матричный коэффициент усиления K находился исходя из квадратичного критерия качества (10) при $Q = E$ и $R = E$. Решение уравнения (12) находилось путем интегрирования соответствующего дифференциального уравнения Риккати в обратном времени при нулевых начальных условиях [10].

Результаты численного моделирования переходных процессов, вызванных нормированным отклонением величиной 0,1 от равновесных значений некоторых фазовых и управляющих координат представлены на рис. 4.



a — $\overline{T}$; - - - - $\overline{g}$; -·-·- $\overline{m}$

b — $\overline{T}$; - - - - $\overline{g}$; -·-·- $\overline{m}$

c — $\overline{G_T}$; - - - - $\overline{G_B}$; -·-·- $\overline{G_{ПС}}$;

d — $\overline{G_T}$; - - - - $\overline{G_B}$; -·-·- $\overline{G_{ПС}}$;

Рис. 4 - Переходные процессы в системе стабилизации режимов КА.

a – пропорциональный регулятор

b – интегрирующий регулятор (фазовые координаты)

c – интегрирующий регулятор (управляющие координаты)

d – наблюдатель расходов

Заключение. Разработанная квазистатическая балансовая модель управляемого процесса сгорания в КА позволяет производить имитационное моделирование различных структур систем управления и их параметрический синтез. К числу важнейших результатов проведенного исследования можно отнести тот факт, что на множестве равновесных режимов, соответствующих множеству тепловых нагрузок КА, предложенная система стабилизации с высокой степенью точности поддерживает заданные значения температуры, давления и коэффициента избытка воздуха. Дальнейшее развитие настоящего исследования связано, прежде всего, с интервальными оценками параметров математической модели КА и синтезом системы управления в условиях неопределенности последних.

Список литературы: 1. *Продюс П.* Регулирование паросиловых установок. – М.: Энергия, 1967. – 368с. 2. *Герасимов С.Г., Дудников Е.Г., Чистяков С.Ф.* Автоматическое регулирование котельных установок. – М.: Энергоиздат, 1967. – 424с. 3. *Плетнев Г.П.* Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368с. 4. *Penson R.P.* Improving baler efficiency// FEN. – 1988. – 13, № 9. – P.68-69. 5. *Richardson Ron.* Improving small boiler combustion control// Contr. and Instrum. – 1987. – 19, № 3. - P. 33-35. 6. *Allen Chris* Application of control to steam boilers// Contr. and Instrum. – 1983. – 15, № 11. - P. 43, 45, 47, 49. 7. *Lebrun J.J., Hannay J., Dols J.M.* Research of good boiler model for HVAC energy simulation. "ASHRAE Transact. Vol. 91.Pt1B: Symp. Pap. Winter Meet., Chocago, III. 1985". Atlanta, Ga, 1985. – P. 60-85. 8. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Теоря моделей в процессах управления. – М.: Наука, 1978. – 223с. 9. *Куценко А.С., Чан Занг Лю* Критерии адекватности динамических и статистических математических моделей технологических процессов // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - № 18. – С. 23 – 28. 10. *Андреев Ю.Н.* Управление конечномерными линейными объектами. – М.: Наука, 1976. – 424с.

Поступила в редколлегию 22.09.06

УДК 681.518

А.В. ПАЛЬЧИК

МИНИМАКСНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА СИСТЕМ, ОПТИМАЛЬНЫХ ПО КВАДРАТИЧНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА

Ця робота присвячена одному з етапів вирішення задачі синтезу системи автоматичного керування, а саме проблемі вибору параметрів керуючого пристрою за умови забезпечення необхідної якості процесу управління. Вибір параметрів здійснюється за умови наявності невизначеності цілі, що виражається у відсутності інформації о параметрах подінтервальної функції квадратичного критерію якості.

Введение. Задача оптимизации системы автоматического управления невозможна без методов оценки качества процесса управления. Наиболее полно оно отражается видом переходного процесса в системе [1], т.е. изменением состояния системы под действием ступенчатого возмущения. Описание переходного процесса вектором характеристик, а также