

УДК 62-40

АЛЬТЕРНАНСНЫЙ МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КАСКАДНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Ю. Э. Плешивцева, А. А. Афиногентов

Самарский государственный технический университет,

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: yulia_pl@mail.ru

Предлагается методика решения задачи структурно-параметрического синтеза типовых регуляторов в многоконтурной каскадной системе автоматического регулирования, разработанная на основе альтернансного метода параметрической оптимизации, обеспечивающего максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению к внешним возмущениям при заданных ограничениях на максимумы амплитудно-частотных характеристик замкнутых контуров синтезируемой системы автоматического регулирования. В качестве примера, представляющего самостоятельный интерес, рассматривается задача оптимизации подсистемы регулирования температуры мазута в многоконтурной системе управления процессом первичной переработки нефти на установке атмосферно-вакуумной трубчатки.

Ключевые слова: структурно-параметрический синтез, каскадная система управления, альтернансный метод оптимизации, задача математического программирования, типовые регуляторы.

Введение. Основной задачей структурно-параметрического синтеза системы автоматического регулирования (САР) является выбор типа регулятора и оптимальных параметров его настройки, которые обеспечивают экстремум заданного критерия качества регулирования при условии обеспечения устойчивости системы.

Сложность решения данной задачи существенно возрастает для многоконтурных каскадных САР. Максимальная степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению друг к другу и к внешним возмущениям может рассматриваться как основной критерий оптимальности в задачах структурно-параметрического синтеза каскадных САР с учётом дополнительных требований к качеству переходных процессов в системе при обеспечении её устойчивости.

Применение типовых инженерных частотных методов для решения задач синтеза одномерных САР отличается наглядностью и простотой интерпретации, однако встречает принципиальные сложности при проектировании регуляторов в условиях ограниченной неопределённости характеристик объектов управления и при синтезе многомерных САР.

Многие важные проблемы аналитического конструирования линейных систем автоматического управления могут быть сведены к задаче минимизации максимума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы от внешнего входа к выходу на множестве стабилизирующих регуляторов (стандартная задача). Эффективное решение задач синтеза каскадных многомерных САР возможно с использованием равномерно-частотных показателей в форме H^∞ -норм $\| \cdot \|_\infty$ частотных характеристик, представляющих собой

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-00926).

максимумы на оси частот максимальных сингулярных чисел матриц соответствующих передаточных функций САР. Это позволяет получить новые эффективные решения типовых задач синтеза в современной постановке [1–3].

В данной работе рассматривается инженерная методика решения на основе альтернативного метода параметрической оптимизации задачи структурно-параметрического синтеза каскадных систем из условия минимизации реактивности САР по отношению к внешним возмущающим воздействиям. Задача решается с учётом дополнительных требований к качеству переходных процессов, формулируемых в виде заданных ограничений на максимумы амплитудно-частотных характеристик локальных замкнутых контуров синтезируемой САР.

В качестве примера, представляющего самостоятельный интерес, рассматривается задача оптимизации подсистемы регулирования температуры мазута в многоконтурной системе управления процессом первичной переработки нефти на установке атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ) нефтеперерабатывающего завода.

1. Постановка задачи структурно-параметрической оптимизации многоконтурных САР. Рассмотрим широко распространённую на практике задачу параметрического синтеза типовых П-, ПИ- и ПИД-регуляторов в многоконтурной каскадной системе управления, которая сводится к выбору оптимальных параметров настройки регуляторов применительно к конкретным объектам управления и технологическим требованиям к качественным показателям переходных процессов в САР.

Рассмотрим многоконтурную каскадную систему (рис. 1), включающую n контуров, которая описывается операторными уравнениями

$$\begin{cases} z_i(p) = W_{ui}(p)u_i(p) + W_{fi}(p)f_i(p), \\ u_i(p) = -W_{pi}(p, \Delta_i)z_i(p), \end{cases} \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $z_i(p)$ — управляемая переменная i -го контура; $W_{ui}(p)$ и $W_{fi}(p)$ — правильные рациональные передаточные функции объекта управления i -го контура по каналам управляющего $u_i(p)$ и возмущающего $f_i(p)$ воздействий, первая определяется в соответствии с заданными номинальными передаточными функциями системы по следующим соотношениям:

$$W_{u1}(p) = C_1(p)e^{-p\tau_i}/D_1(p);$$

$$W_{ui}(p) = \frac{W_{p(i-1)}(p)W_{u(i-1)}(p)}{1 + W_{p(i-1)}(p)W_{u(i-1)}(p)} + C_i(p)/D_i(p), \quad i = \overline{2, n}, \quad (2)$$

а вторая, в состав которой может быть включена любая необходимая информация о спектральном составе возмущения, должна удовлетворять гипотезе о низкочастотном характере

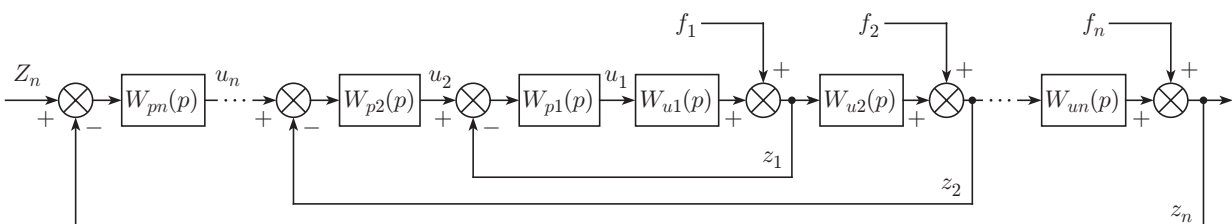


Рис. 1. Структурная схема многоконтурной каскадной САР

возмущений и может быть представлена как

$$W_{fi}(p) = M_i(p)/N_i(p), \quad (3)$$

где $C_i(p)$, $D_i(p)$, $M_i(p)$, $N_i(p)$ — известные рациональные полиномы.

Передаточные функции регуляторов $W_{pi}(p, \Delta)$, $i = \overline{1, n}$, заданные в типовой дробно-рациональной форме, имеют вид

$$W_{pi}(p, \Delta_i) = \sum_{j=1}^{r_i} \Delta_{ij} p^{j-1} / \left(p^{s_i} \left(1 + \sum_{j=r+1}^{k_i} \Delta_{ij} p^{j-r} \right) \right), \quad s_i \geq 0, \quad r_i \geq 1, \quad k_i \geq r_i. \quad (4)$$

Здесь $\Delta_i = (\Delta_{ij})$, $j = \overline{1, k_i}$, — искомый вектор неизвестных параметров настройки регулятора i -го контура.

В ряде случаев [2] в качестве критерия оптимизации $I_i(\Delta_i)$ i -го контура, характеризующего реакцию системы на внешнее возмущение с ограниченной дисперсией в условиях неполной информации о частотном спектре воздействий, выбирают максимум амплитудно-частотной характеристики $I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{fzi}(i\omega, \Delta_i)|$ данного контура по каналу возмущающего воздействия, имеющего передаточную функцию $W_{fzi}(p, \Delta_i)$.

В результате задача сводится к поиску n векторов параметров $\Delta_i = (\Delta_{ij})$, $j = \overline{1, k_i}$, $i = \overline{1, n}$, настройки регуляторов, минимизирующих максимумы АЧХ всех контуров номинальной системы по каналам действия возмущений:

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{fzi}(i\omega, \Delta_i)| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где G_n — множество Δ_i , обеспечивающее устойчивость i -го контура; $W_{fzi}(i\omega, \Delta)$ — амплитудно-фазовая характеристика i -го контура по каналу возмущения, определяемая как

$$W_{fzi}(i\omega, \Delta_i) = \frac{W_{fi}(i\omega)}{1 + W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Согласно (6) минимаксный критерий оптимизации i -го контура записывается в виде

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} \left| \frac{W_{fi}(i\omega)}{1 + W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)} \right| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

При этом требования к качественным показателям i -го контура часто могут быть сформулированы в виде ограничения на максимум АЧХ $|W_{uzi}(i\omega, \Delta_i)|$ данного контура по каналу управляющего воздействия, где

$$W_{uzi}(i\omega, \Delta_i) = \frac{W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}{1 + W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

В качестве такого ограничения целесообразно рассматривать величину показателя колебательности M_i , представляющего собой максимальное значение АЧХ $|W_{uzi}(i\omega, \Delta_i)|$ на частотной оси в относительных единицах:

$$F_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} \left| \frac{W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)}{1 + W_{ui}(i\omega)W_{pi}(i\omega, \Delta_i)} \right| \leq M_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Таким образом, приходим к параметризованной задаче (7), (9) оптимизации n контуров управления многомерной каскадной системы, при этом задача структурно-параметрического синтеза i -го контура приводится к стандартному виду задачи полубесконечной оптимизации:

$$I_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{fzi}(i\omega, \Delta_i)| \rightarrow \min_{\Delta_i \in G_n \subset E^n}, \quad (10)$$

$$F_i(\Delta_i) = \max_{\omega \in [0, \infty)} |W_{uzi}(i\omega, \Delta_i)| \leq M_i, \quad (11)$$

в которой требуется найти вектор оптимальных параметров $\Delta_i = (\Delta_{ij})$, $j = \overline{1, k_i}$, типового регулятора $W_{pi}(p, \Delta_i)$, обеспечивающего минимальную реакцию i -го контура на внешнее возмущающее воздействие согласно критерию (10) в условиях ограничения (11) на показатель колебательности переходных процессов i -го контура.

2. Решение задачи параметрической оптимизации типовых регуляторов на основе альтернансного метода. При выбранной структуре регулятора $W_{pi}(p, \Delta_i)$ задача (10), (11) параметрического синтеза типовых регуляторов представляет собой задачу математического программирования с бесконечным числом ограничений типа (11), которая может быть решена на базе альтернансного метода параметрической оптимизации [2, 4].

В соответствии с альтернансным методом для решения задачи (10), (11), представляющего собой некоторый вектор параметров $\Delta_i^{\text{опт}}$, справедливы специальные альтернансные свойства, согласно которым на оси частот $\omega \in [0, \infty[$ найдутся не менее $R_{fi} \geq 1$ различных точек ω_{fiq} , $q = \overline{1, R_{fi}}$, и $R_{ui} \geq 1$ различных точек ω_{uis} , $s = \overline{1, R_{ui}}$, где частотные характеристики $|W_{fzi}(i\omega, \Delta_i^{\text{опт}})|$ и $|W_{uzi}^0(i\omega, \Delta_i^{\text{опт}})|$ достигают своих максимальных значений $I_i(\Delta_i^{\text{опт}})$ и $F_i(\Delta_i^{\text{опт}}) = M_i$ соответственно при выполнении условия

$$R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1 \quad (12)$$

(k_i — число искоемых параметров настройки регулятора $W_{pi}(p, \Delta_i)$).

Исключением является ситуация, когда имеется минимальное число таких точек, т. е. $R_{fi} = 1$ и/или $R_{ui} = 1$, тогда возможно выполнение неравенства

$$R_{fi} + R_{ui} < k_i + 1, \quad \text{если } k_i \geq 2. \quad (13)$$

Отмеченные свойства позволяют составить в случае (12) замкнутую систему $k_i + 1$ уравнений для АЧХ $|W_{fzi}(i\omega, \Delta_i^{\text{опт}})|$ и $|W_{uzi}^0(i\omega, \Delta_i^{\text{опт}})|$ относительно всех $k_i + 1$ искоемых параметров, в роли которых выступают k_i компонент $\Delta_{ij}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, k_i}$, вектора $\Delta_i^{\text{опт}}$ и минимум $I_i(\Delta_i^{\text{опт}})$.

При наличии информации о форме соответствующих АЧХ можно дополнить данную систему уравнений условием существования экстремума указанных частотных характеристик в этих точках. Тогда получаем систему $2(k_i + 1)$ уравнений

$$\begin{cases} |W_{fzi}(i\omega_{fiq}^{\text{опт}}, \Delta_i^{\text{опт}})| - I_i(\Delta_i^{\text{опт}}) = 0, & \frac{\partial}{\partial \omega} |W_{fzi}(i\omega_{fiq}^{\text{опт}}, \Delta_i^{\text{опт}})| = 0, \\ |W_{uzi}(i\omega_{uis}^{\text{опт}}, \Delta_i^{\text{опт}})| - M_i = 0, & \frac{\partial}{\partial \omega} |W_{uzi}(i\omega_{uis}^{\text{опт}}, \Delta_i^{\text{опт}})| = 0, \\ q = \overline{1, R_{fi}}, \quad s = \overline{1, R_{ui}}, \quad R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1, \end{cases} \quad (14)$$

решением которой являются k_i параметров настроек регулятора $\Delta_{ij}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, k_i}$, величина $I_i(\Delta_i^{\text{опт}})$, частоты ω_{fiq} , $q = \overline{1, R_{fi}}$, и ω_{uis} , $q = \overline{1, R_{ui}}$.

Для типового случая, когда $R_{fi} + R_{ui} = k_i < k_i + 1$, дополнительное уравнение записывается как условие равенства нулю определителя, составленного из производных АЧХ по каналам управления и возмущения по искомым параметрам регулятора [1, 2]:

$$\det \left[\frac{\partial |W_{uzi}(i\omega_{uis}^{\text{опт}}, \Delta_i^{\text{опт}})|}{\partial \Delta_{ij}}, \frac{\partial |W_{fzi}(i\omega_{fiq}^{\text{опт}}, \Delta_{fis}^{\text{опт}})|}{\partial \Delta_{ij}} \right] = 0, \quad (15)$$

$$s = \overline{1, R_{ui}}, \quad q = \overline{1, R_{fi}}, \quad R_{ui} + R_{fi} = k_i, \quad j = \overline{1, k_i}.$$

В (13) необходим предварительный однозначный выбор комбинации величин R_{fi} и R_{ui} , допустимой в рамках этого варианта, после чего задача сводится к совместному решению систем уравнения вида (14), (15).

При оптимизации i -го контура с ПИ-регулятором, передаточная функция которого имеет вид (4) при $r_i = k_i = 2$, $s_i = 1$, число искоемых параметров настройки регулятора $k_1 = 2$: $\Delta_{i1}^{\text{опт}}$, $\Delta_{i2}^{\text{опт}}$. Амплитудно-частотные характеристики контура с ПИ-регулятором могут иметь либо по одному экстремуму по обоим каналам, т. е. $R_{fi} = R_{ui} = 1$, либо один экстремум по каналу управления и два экстремума по каналу возмущения: $R_{fi} = 2$, $R_{ui} = 1$, либо два экстремума по каналу управления и один экстремум по каналу возмущения: $R_{fi} = 1$, $R_{ui} = 2$.

В первом случае имеет место исключение из свойства (12) и для поиска оптимальных параметров настройки регулятора необходимо решить систему (14) совместно с (15) для $q = 1$, $s = 1$; во втором и третьем — реализуется вариант (12) и для нахождения вектора оптимальных параметров необходимо решить систему уравнений (14) для $q = \overline{1, 2}$, $s = 1$ или $q = 1$, $s = \overline{1, 2}$.

Для i -го контура с ПИД-регулятором число искоемых параметров $k_i = 3$: $\Delta_{i1}^{\text{опт}}$, $\Delta_{i2}^{\text{опт}}$ и $\Delta_{i3}^{\text{опт}}$. Здесь возможны следующие сочетания R_{fi} и R_{ui} :

- а) $R_{fi} + R_{ui} = k_i + 1$ при $R_{fi} = 2$ и $R_{ui} = 2$;
- б) $R_{fi} + R_{ui} = k_i$ при $R_{fi} = 1$ и $R_{ui} = 2$;
- в) $R_{fi} + R_{ui} = k_i$ при $R_{fi} = 2$ и $R_{ui} = 1$.

Оптимальное решение задачи выбора настроек ПИД-регулятора является одновременно единственным решением системы уравнений, реализуемой для конкретного набора максимумов АЧХ, при этом два других варианта системы уравнений не будут иметь решения. Таким образом, возникает необходимость проводить исследования для каждого из приведённых случаев и определять вектор параметров $\Delta_{ij}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, 3}$, являющийся единственным решением рассматриваемой задачи.

Для решения задачи параметрической оптимизации многоконтурной каскадной САР на базе альтернативного метода предлагается последовательность стандартных вычислительных процедур поиска оптимальных настроек типовых регуляторов локальных контуров регулирования.

На первом этапе решения задачи структурно-параметрического синтеза формулируются требования к качеству регулирования в частотной области в виде задания ограничений на показатели колебательности M_i , $i = \overline{1, n}$, для всех контуров регулирования.

На втором этапе выбирается структура и определяются оптимальные параметры настройки $\Delta_{1j}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, k_1}$, типового регулятора контура управления $i = 1$ по вышеописанной схеме альтернативного метода исходя из требований обеспечения заданной степени колебательности M_1 первого контура по каналу задающего воздействия и минимизации реакции контура на внешнее нерегулируемое возмущающее воздействие f_1 .

На каждом последующем этапе решается задача структурно-параметрического синтеза типового регулятора i -го контура управления ($i = \overline{2, n}$), т. е. выбирается структура и определяются оптимальные параметры настройки $\Delta_{ij}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, k_i}$, $i = \overline{2, n}$, по схеме альтернативного метода на основании требований обеспечения заданной степени колебательности M_i рассматриваемого контура по каналу задающего воздействия и минимизации реакции контура на внешнее нерегулируемое возмущающее воздействие f_i при выбранных на предыдущих этапах структурах и оптимальных параметрах настройки регуляторов $\Delta_{lj}^{\text{опт}}$, $j = \overline{1, k_l}$, $l = \overline{1, i-1}$, контуров от 1-го до $(i-1)$ -го.

На заключительном этапе проводится оценка качества полученных переходных процессов системы и её устойчивости.

Предложенная методика может быть применена в случаях, когда звенья транспортно-го запаздывания либо вовсе отсутствуют в структуре объекта управления, либо времена запаздывания достаточно малы по сравнению с постоянными времени объекта для того, чтобы ими можно было пренебречь. Однако во многих случаях динамика объектов управления описывается мультипликативными передаточными функциями, состоящими из апериодических звеньев первого и второго порядков и звеньев транспортного запаздывания. Применение методики структурно-параметрического синтеза типовых регуляторов в условиях учёта звена транспортного запаздывания рассмотрено в работе [5].

Инженерная методика структурно-параметрического синтеза типовых регуляторов каскадной САР использовалась в решении задачи оптимизации технологического процесса первичной переработки нефти на установке атмосферно-вакуумной трубчатки.

3. Параметрическая оптимизация многоконтурной САР процесса первичной переработки нефти. Одной из важных составляющих вакуумного блока установки АВТ является печь, предназначенная для подогрева мазута (сырья) в целях получения вакуумного газойля широкого фракционного состава (350–500 °С) и перегрева пара, который в дальнейшем поступает в вакуумную колонну и в отпарные колонны установки АВТ.

Рассмотрим типовую структуру системы автоматического регулирования температуры мазута вакуумного блока перегонки нефти установки АВТ (рис. 2) [5, 6].

Подсистема регулирования температуры мазута является многоконтурной и состоящей из нескольких локальных САР, представляющих типовые структуры:

1) каскадную систему с двумя контурами регулирования (регуляторы $W_{p1}(p, \Delta_1)$ и $W_{p2}(p, \Delta_2)$) по температуре мазута z_2 на выходе из печи и давлению жидкого топлива z_1 , подаваемого в печь;

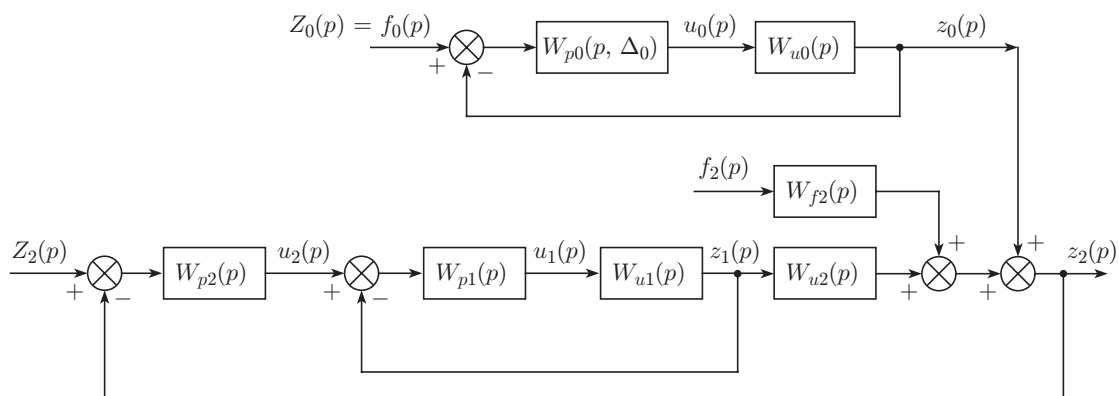


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры мазута вакуумного блока установки АВТ

2) одноконтурную систему регулирования (регулятор $(W_{p0}(p, \Delta_0))$) расхода пара z_0 , подаваемого в печь.

Объектом управления внутреннего контура является участок трубопровода, служащий для подачи топлива в печь, с передаточной функцией $W_{u1}(p)$. Линейная комбинация передаточной функции замкнутой системы регулирования внутреннего контура и передаточной функции $W_{u2}(p)$, описывающей динамику температуры z_2 нагреваемого в печи объёма сырья и представленной аperiodическим звеном второго порядка, задаёт передаточную функцию объекта управления для внешнего контура регулирования.

Основными внешними возмущениями, обрабатываемыми САР, являются изменение расхода f_0 перегретого пара, подаваемого в печь, и изменение расхода f_2 нагреваемого сырья (мазута). При этом расход перегретого пара z_0 регулируется локальной САР.

Система автоматического регулирования расхода пара, подаваемого в печь, представляет собой одноконтурную систему управления с регулятором $W_{p0}(p, \Delta_0)$. В качестве управляющего воздействия u_0 выступает изменение подачи пара в змеевики печи. Объектом управления является участок паропровода, служащего для подачи пара в печь, который описывается передаточной функцией $W_{u0}(p)$.

Передаточные функции объектов управления $W_{u0}(p)$, $W_{u1}(p)$, $W_{u2}(p)$ с постоянными коэффициентами получены на стадии анализа действующей САР установкой АВТ и приведены в таблице.

Согласно описанию САР температуры мазута на выходе из печи, структура которой показана на рис. 2, каждый i -й локальный контур в каскадной системе регулирования и контур регулирования расхода пара, подаваемого в печь, характеризуются следующими величинами: $z_i(p)$ — управляемая переменная; Z_i — задающее воздействие; $u_i(p)$ и $f_i(p)$, $i = \overline{0, 2}$, — управляющее и возмущающее воздействия соответственно.

Передаточные функции регуляторов $W_{pi}(p, \Delta_i)$, $i = \overline{0, 2}$, считаются заданными с точностью до вектора параметров $\Delta_i = (\Delta_{ij})$, $j = \overline{1, k_i}$, и представляются в типовой дробно-рациональной форме вида (4).

Инженерная задача поиска оптимальных параметров настройки типовых регуляторов в структуре многоконтурной САР температуры мазута вакуумного блока перегонки установки АВТ была редуцирована к задачам определения соответствующих параметров ПИД-регуляторов с учётом требований к качеству процесса регулирования, формируемых в частотной области в виде функций максимума АЧХ согласно общей методике, представленной в разд. 1, 2.

Контур САР	Передаточная функция	Параметры настройки регулятора
$i = 1$ ($M_1 = 1,6$)	$W_{u1}(p) = \frac{1}{16p + 1}$	$\Delta_{11}^{\text{опт}} = 6$, $\Delta_{12}^{\text{опт}} = 6,23$, $\Delta_{13}^{\text{опт}} = 2,82$
$i = 2$ ($M_2 = 1,3$)	$W_{u2}(p) = \frac{49}{742p^2 + 239p + 1}$, $W_{f2}(p) = \frac{68(4,7p + 1)}{742p^2 + 239p + 1}$	$\Delta_{21}^{\text{опт}} = 0,144$, $\Delta_{22}^{\text{опт}} = 1,47$, $\Delta_{23}^{\text{опт}} = 3,82$
$i = 0$ ($M_0 = 1,35$)	$W_{u0}(p) = \frac{1}{3,6p + 1}$	$\Delta_{01}^{\text{опт}} = 1,49$, $\Delta_{02}^{\text{опт}} = 0,15$, $\Delta_{03}^{\text{опт}} = 10,5$

На первом этапе решения рассматриваемой задачи параметрической оптимизации определяются настройки регулятора контура управления $i = 1$ (внутреннего контура регулирования каскадной САР температуры мазута), для которого не задан канал возмущающее воздействие — регулируемая величина.

Параметры настройки регулятора для контура $i = 1$ находятся различными методами, в том числе с использованием частотных характеристик. Эффективным подходом в такой ситуации может стать фиксация значения частоты первого максимума АЧХ замкнутой системы управления и одного из векторов параметров настройки регулятора $\Delta_1^{\text{опт}} = (\Delta_{1j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, тогда два оставшихся неизвестных параметра будут определены решением системы уравнений (14) относительно этих параметров и значения частоты второго максимума АЧХ.

Передаточные функции, значение показателя колебательности M_1 и выбранные параметры настройки ПИД-регулятора внутреннего контура $i = 1$ приведены в таблице.

Вторым этапом решения задачи параметрической оптимизации являлась настройка внешнего контура каскадной системы $i = 2$ (поиск вектора параметров настройки $\Delta_2^{\text{опт}} = (\Delta_{2j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, регулятора $W_{p2}(p, \Delta_2)$) с учётом минимизации реакции САР на возмущающее воздействие f_2 по вышеописанной схеме альтернативного метода при фиксированных (полученных на этапе 1) значениях оптимальных параметров настройки $\Delta_1^{\text{опт}} = (\Delta_{1j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, регулятора $W_{p1}(p, \Delta_2)$.

Амплитудно-частотные характеристики замкнутых САР приведены на рис. 3 для передаточных функций, значения показателя колебательности M_2 и расчётных параметров настройки ПИД-регулятора контура регулирования $i = 2$ представлены в таблице.

На третьем этапе решения задачи параметрической оптимизации САР температуры мазута определяются параметры $\Delta_0^{\text{опт}} = (\Delta_{0j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, настройки регулятора $W_{p0}(p, \Delta_0)$ локальной САР расхода пара, подаваемого в печь, по схеме альтернативного метода.

Особенностью применения описанных здесь методик является выбор в качестве критерия оптимальности $I_0(\Delta_0^{\text{опт}})$ максимума АЧХ системы регулирования по каналу возмущения, для которого синтезируемый контур регулирования выступает в качестве внешнего контролируемого воздействия. Функционал $F_0(\Delta_0^{\text{опт}})$ задаётся в виде максимума АЧХ номинальной системы по каналу управляющего воздействия при заранее фиксированных значениях $\Delta_1^{\text{опт}} = (\Delta_{1j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, и $\Delta_2^{\text{опт}} = (\Delta_{2j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, определённых на предыдущих этапах решения задачи.

Так как в данном случае в качестве минимизируемого функционала $I_0(\Delta_0^{\text{опт}})$ рассматривается максимум АЧХ контура $i = 0$ по каналу возмущения f_0 , искомый вектор

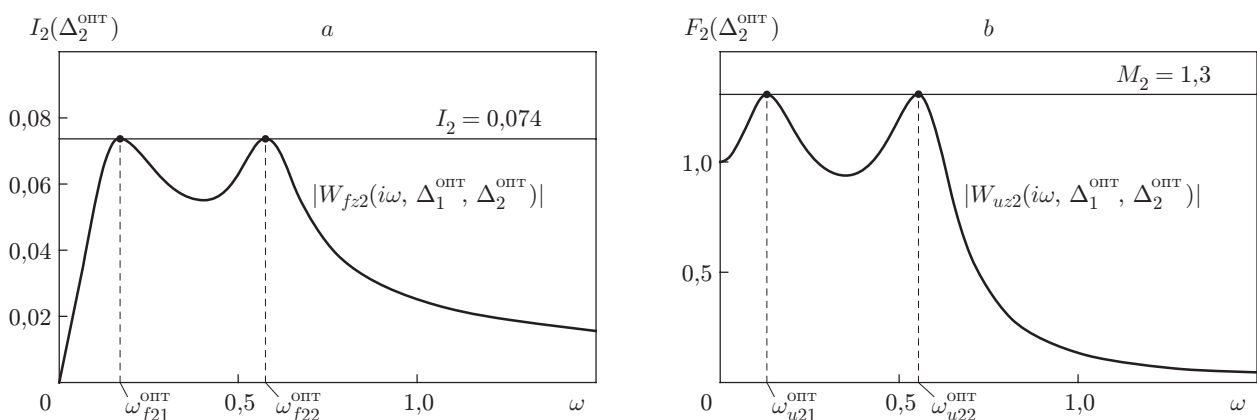


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы контура регулирования $i = 1$: по каналам возмущения (а) и управления (б)

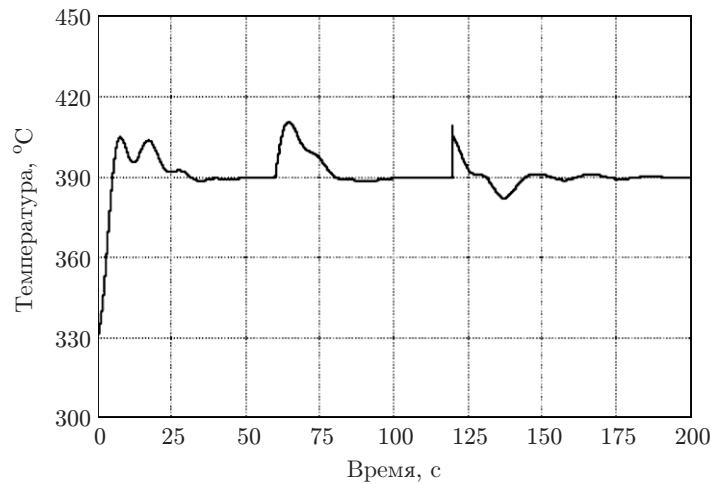


Рис. 4. Переходные процессы в системе автоматического регулирования температуры мазута установки АВТ

параметров $\Delta_0^{\text{опт}} = (\Delta_{0j}^{\text{опт}})$, $j = \overline{1, 3}$, настройки регулятора $W_{p0}(p, \Delta_0)$ позволяет скорректировать частотные свойства замкнутой САР расхода пара, подаваемого в печь, в условиях заданных ограничений на показатель колебательности системы M_0 , исходя из условия минимизации влияния по каналу возмущающее воздействие — регулируемая величина относительно каскадной САР температуры мазута. Значения показателя колебательности M_0 и расчётных параметров настройки ПИД-регулятора контура регулирования $i = 0$ представлены в таблице.

На рис. 4 приведён график переходных процессов в синтезируемой САР с оптимальными параметрами настройки регуляторов при первоначальном пуске печи с выходом на заданную температуру мазута ($Z_1 = 390^\circ\text{C}$) и действии внешних возмущений: изменение расхода перегретого пара (по каналу $f_2 \rightarrow z_2$) в момент времени $t_1 = 60$ с и изменение расхода сырья (по каналу $f_0 \rightarrow z_0$) в момент времени $t_2 = 120$ с.

Заключение. Альтернативный метод структурно-параметрического синтеза многоконтурной каскадной САР обеспечивает достижение предельных показателей качества регулирования при заданных ограничениях, которые формируются в частотной области с помощью соответствующих условий, наложенных на максимумы амплитудно-частотных характеристик локальных замкнутых контуров синтезируемой САР. Применение альтернативного метода параметрической оптимизации даёт возможность получить максимальную степень инвариантности локальных контуров регулирования по отношению друг к другу и внешним возмущениям. Минимизация реакции системы на внешние возмущения рассматривается в качестве основного критерия оптимальности САР с учётом дополнительных требований к устойчивости системы регулирования.

Описанная методика решения задачи структурно-параметрического синтеза САР реализована для оптимизации САР температуры мазута вакуумного блока установки АВТ. Такой подход позволил найти точное решение задачи параметрического синтеза анализируемой САР, обеспечивающее при требуемом показателе качества регулирования (показателе колебательности M) по каналу задания каждого локального контура управления минимально возможную реакцию на внешние возмущающие воздействия.

На основе альтернативного метода параметрической оптимизации найдены настройки регулятора в контуре управления внешним возмущением (САР расхода пара, подаваемого в печь) при требуемом показателе качества регулирования (показателе колебательности M) по каналу задания САР расхода пара, подаваемого в печь, и обеспечении минимально

возможной реакции на внешнее возмущающее воздействие основной САР температуры мазута.

Данный метод может быть использован для комплексной настройки многоконтурных САР по критерию минимального взаимного влияния взаимосвязанных контуров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рапопорт Э. Я. Альтернансный метод параметрического синтеза H^∞ -оптимальных систем автоматического управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2000. № 1. С. 79–90.
2. Рапопорт Э. Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
3. Плешивцева Ю. Э., Рапопорт Э. Я. Совместная оптимизация по системным критериям качества взаимосвязанных процессов технологической теплофизики в производственных комплексах обработки металла давлением // Автометрия. 2013. 49, № 6. С. 3–13.
4. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автометрия. 2009. 45, № 5. С. 103–112.
5. Афиногентов А. А., Плешивцева Ю. Э., Сетин С. П., Тычинина Ю. А. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического регулирования процесса первичной переработки нефти с объектом регулирования с транспортным запаздыванием // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2014. № 4(44). С. 160–169.
6. Афиногентов А. А., Плешивцева Ю. Э., Сетин С. П., Снопков А. С. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического управления технологическим процессом первичной переработки нефти // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2013. № 4(40). С. 169–180.

Поступила в редакцию 2 марта 2015 г.
