

*Канд. техн. наук, доцент Дрючин В.Г.
Ассистент Ткачев Р.Ю.
(ДонГТУ, г Алчевск, Украина)*

СИНТЕЗ МНОГОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Пропонується метод синтезу регуляторів для багатоконтурних об'єктів управління, які забезпечують бажані показники якості замкнутої системи. Метод поширюється на об'єкти, що містять запізнювання в каналі управління. Результати ілюструються прикладом синтезу промислової системи стабілізації збагачення доменного дуття киснем.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Исключительные трудности при выборе способа управления объектами с транспортным запаздыванием возникают тогда, когда запаздывание оказывается равным постоянной времени объекта или превышает ее в несколько раз. Максимально допустимый коэффициент усиления при этом оказывается недостаточным для получения необходимой точности, так как запаздывание вводит большое отставание по фазе. Для большинства технологических объектов может оказаться целесообразным переход от одноконтурных систем управления к многоконтурным [1]. При этом находят промежуточный параметр, который в лучшем случае, не содержит запаздывание и является малоинерционным по сравнению с основным параметром. Известно много способов улучшения качественных показателей в системах с запаздыванием. Однако большинство из них приводили к улучшению показателей только в определенных условиях [2].

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время известно два метода расчета многоконтурных систем с запаздыванием: с включением стабилизирующего устройства общего типа в цепь внутренних обратных связей [1], образуя так называемую параллельную коррекцию, и второй метод – с каскадным включением регулирующих устройств [1-4]. Последние нашли широкое промышленное применение благодаря простоте расчета и удобству в наладке, так как настраивается поочередно каждый контур управления. Наряду с указанными достоинствами такие классические системы подчиненного

регулирующие обладают рядом недостатков – высокая чувствительность к изменениям параметров объекта управления, растущий порядок системы, поскольку порядок следующего контура увеличивается на порядок предыдущего плюс порядок астатизма этого контура. К недостаткам также можно отнести невысокие коэффициенты усиления контурных регуляторов следствием чего является возможное наличие запаздывания в одном или нескольких контурах управления.

При использовании этого метода проектировщик должен обладать большим опытом настройки подобных систем, поскольку должен выбирать для каждого контура соответствующие качественные показатели или критерии.

Устранить перечисленные недостатки систем подчиненного регулирования с сохранением их достоинств и решить большинство технических вопросов можно путем синтеза контуров управления методами аналитического конструирования.

Постановка задачи. Разработать метод синтеза систем подчиненного управления объектами с транспортным запаздыванием, обладающего упрощенной процедурой оптимизации параметров контурных регуляторов.

Изложение материала и его результаты. Рассмотрим объект управления с запаздыванием (рис. 1), у которого кроме основной выходной координаты можно еще измерить s координат, причем каждая переменная имеет чистое запаздывание. Здесь \tilde{y}_i выходная координата i -го контура, измеряемая соответствующим датчиком.

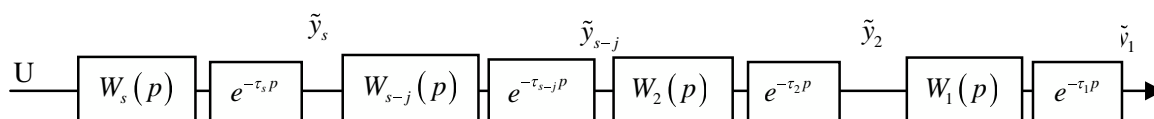


Рисунок 1 – Структурная схема объекта управления с s -измеряемыми координатами

Для синтеза системы управления многоконтурным объектом с запаздыванием в начале произведем компенсацию запаздывания каждого контура, например, способом Смита. Компенсация по способу Смита позволит нам избавиться от влияния запаздывания на устойчивость системы в целом и даст возможность перейти к «мнимым» (модельным, т.е. созданным искусственно) координатам, которые будут характеризовать аналогичные процессы в объекте управления без запаздывания. Это позволяет нам при синтезе оптимального регулятора использовать модель инерционной части объекта управления (рис.2).

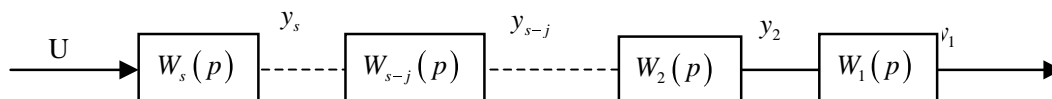


Рисунок 2 – Расчетная структурная схема объекта управления с скомпенсированным запаздыванием

Предположим, что количество датчиков измеряющих состояния динамического процесса равно порядку дифференциальных уравнений.

Синтез регулирующего устройства будем проводить не для каждого промежуточного объекта (промежуточной переменной) [2-4], а для эквивалентного объекта имеющего общий порядок s , определяя при этом основную цель управления только для выходной (главной) управляемой переменной. Промежуточные переменные сами, в процессе оптимального движения выходной переменной, выберут свое оптимальное движение в пространстве координат. Это позволит упростить процедуру расчета, так как не потребуется вычислять управления для промежуточных переменных.

Запишем дифференциальные уравнения, характеризующие объект

$$\begin{aligned} \dot{y}_k &= \sum_{\alpha} b_{k\alpha} y_{\alpha}, \quad k = 1, \dots, s-1 \\ \dot{y}_s &= \sum_{\alpha} b_{s\alpha} y_{\alpha} + mU. \end{aligned} \quad (1)$$

где y_{α} - обобщенные «мнимые» координаты,
 $b_{k\alpha}$ - параметры объекта регулирования.

Определим цель управления в виде функционала

$$J = \int_0^{\infty} \left(\sum_k a_k y_k^2 + U^2 \right) dt, \quad k = 1, 2, \dots, s. \quad (2)$$

с неизвестными весовыми коэффициентами функционала a_k , определяющие качество управления, и его экстремаль в виде назначенной траектории по «мнимой» выходной координате y_1 синтезируемой системы вида

$$y_1(t) = \sum_{i=0}^s C_i \exp(p_i t). \quad (3)$$

Решая эту задачу методом динамического программирования, определим управление U , которое минимизирует функционал (2)

$$U = -\sum_{\alpha} \sum_k m A_{k\alpha} y_{\alpha} = \sum_{\alpha} n_{\alpha} y_{\alpha}, \quad (4)$$

где $A_{k\alpha}$ – неизвестные коэффициенты функции Ляпунова,
 $n_{\alpha} = m A_{k\alpha}$.

Уравнения (1) и (4) описывают движение замкнутой синтезируемой системы и полностью определяют структуру оптимальной системы управления (рис.3), а заданная экстремаль (3) является решением этой системы уравнений. Поэтому оказывается возможным отыскать неизвестные коэффициенты $A_{k\alpha}$ оптимального управления (4) из условия воспроизведения этой экстремали.

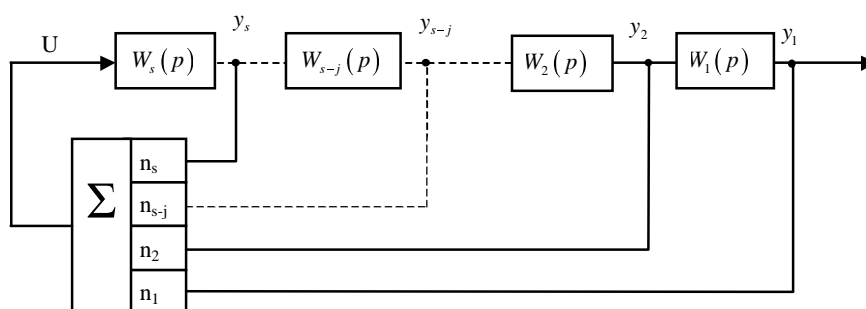


Рисунок 3 – Структурная схема замкнутой системы оптимального управления

Преобразуем, полученную структурную схему (см.рис.3) к виду представленному на рис.4 и получим многоконтурную систему управления.

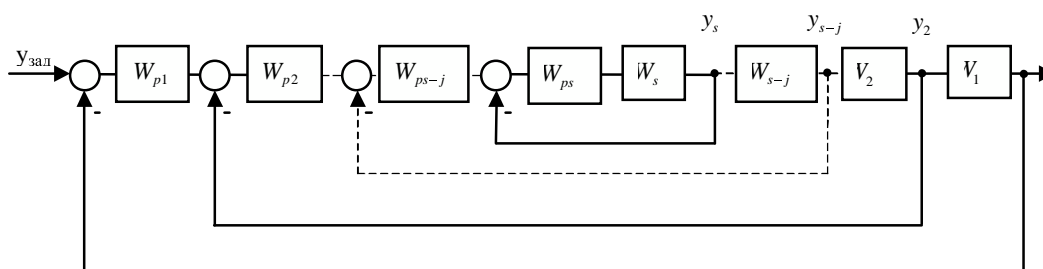


Рисунок 4 – Эквивалентная структурная схема многоконтурной системы оптимального управления

При этом передаточная функция каждого контурного регулятора будет иметь вид

$$W_{pi} = \frac{n_i}{n_{i+1}}, i = 1, 2, \dots, s-1, \quad (5)$$

$$W_{ps} = n_s.$$

Полученная таким образом система управления является статической, поскольку регуляторы (4) являются пропорциональными, что не всегда является приемлемым с точки зрения обеспечения требуемого качества управления. Для обеспечения астатизма системы управления необходимо учесть при синтезе исполнительные устройства, обладающие интегрирующими свойствами, в каждом контуре. Т.е. синтез необходимо проводить для эквивалентного объекта, общий порядок которого $s+r_i$. Здесь r – порядок астатизма i -го контура. Приняв порядок астатизма для каждого контура равным единице, получим порядок системы дифференциальных уравнений объекта управления равным $2s$ и тогда

$$\dot{y}_k = \sum_{\alpha} b_{\beta\alpha} y_{\alpha}, \quad \beta = 1, \dots, 2s-1$$

$$\dot{y}_{2s} = mU.$$

Задавшись функционалом вида (2), и экстремалью (3). Снова решим поставленную задачу методом динамического программирования и получим управление аналогичное (4). После структурных преобразований передаточная функция каждого контурного регулятора определится в виде

$$W_{pj} = \frac{\frac{n_{2i}}{b_{j,2i}} p + \left(\frac{n_{2i-1}}{k_j} + n_{2i} \right)}{\frac{n_{2i+2}}{b_{j-1,2i+2}} p + \left(\frac{n_{2i+1}}{k_{j+1}} + n_{2i+2} \right)}, \quad i = 1, 2, \dots, s, \dots, 2s-2, \quad j = 1, 2, \dots, s-1,$$

$$W_{ps} = \frac{n_{2s}}{b_{s-1,2s}} p + \left(\frac{n_{2s-1}}{k_s} + n_{2s} \right).$$

где $p=d/dt$ – оператор дифференцирования;
 k_j – коэффициент передачи объекта j -го контура.

Или с учетом в регуляторе интегрирующего звена получим

$$W_{pi} = \frac{\frac{n_{2i}}{b_{j,2i}} p + \left(\frac{n_{2i-1}}{k_j} + n_{2i} \right)}{\frac{n_{2i+2}}{b_{j-1,2i+2}} p + \left(\frac{n_{2i+1}}{k_{j+1}} + n_{2i+2} \right)} \frac{1}{p}, \quad i = 1, 2, \dots, s, \dots, 2s-2, \quad j = 1, 2, \dots, s-1, \quad (6)$$

$$W_{ps} = \frac{\frac{n_{2s}}{b_{s-1,2s}} p + \left(\frac{n_{2s-1}}{k_s} + n_{2s} \right)}{p}.$$

Таким образом, во внутреннем контуре с регулирующим устройством будет ПИ-регулятор, а в последующих интегрирующе-дифференцирующее звено с И- регулятором.

В таких системах полностью сохраняется принцип подчиненного регулирования, поскольку главной управляемой переменной является та, которая определяет основную цель управления. Остальные переменные считаются вспомогательными и подчиненными главной. Кроме того, вспомогательные переменные также находятся во взаимном подчинении.

Для иллюстрации применения изложенного метода к конкретным задачам была разработана система стабилизации обогащения доменного дутья кислородом и внедрена на практике в теплосиловом цехе Алчевского металлургического комбината ОАО «АМК» на турбовоздуходувке №2.

Объект управления был аппроксимирован по каналу измерения расхода кислорода - в виде передаточной функции апериодического звена первого порядка

$$W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1} = \frac{5}{1.2 p + 1},$$

а по каналу измерения концентрации кислорода в дутье в виде передаточной функции апериодического звена первого порядка с запаздыванием.

$$W_1 = \frac{k_1 e^{-\tau p}}{T_1 p + 1} = \frac{0.35}{15 p + 1} e^{-40 p}.$$

Скомпенсируем запаздывание чисто, по способу Смита.

Для обеспечения астатизма первого порядка добавим в каждый контур по одному интегрирующему звену. При этом во внутреннем контуре в качестве интегрирующего звена будем учитывать исполнительный механизм постоянной скорости.

Запишем дифференциальные уравнения соответствующие эквивалентному объекту без запаздывания

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= b_{11}y_1 + b_{12}y_2, \\ \dot{y}_2 &= y_3, \\ \dot{y}_3 &= b_{33}y_3 + b_{34}y_4, \\ \dot{y}_4 &= mU, \end{aligned}$$

где $b_{11}=-1/15$, $b_{12}=0,35/15$, $b_{33}=-1/1,2$, $b_{34}=5/1,2$, $m=1/63$.

Выберем функционал

$$J = \int_0^{\infty} (a_1y_1^2 + a_2y_2^2 + a_3y_3^2 + a_4y_4^2 + U^2) dt,$$

и экстремаль по выходной координате системы y_1 , соответствующую стандартной биномиальной форме

$$y_1 = (C_1 + C_2t + C_3t^2 + C_4t^3) \cdot \exp\left(-\frac{1}{3}t\right).$$

В соответствии с методом динамического программирования окончательно получим управление в виде

$$U = -(1.04y_1 + 0.78y_2 + 3.34y_3 + 10.5y_4).$$

На рис.6 приведена структурная схема синтезированного оптимального регулятора.

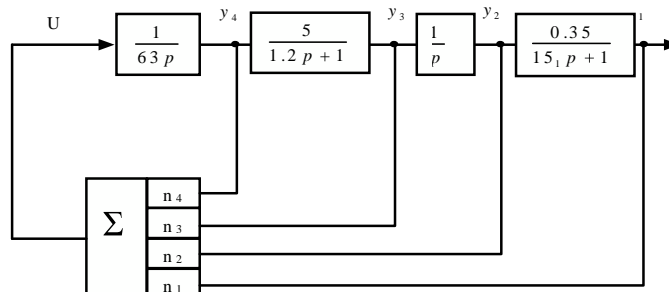


Рисунок 5 – Структурная схема оптимального регулятора

Произведя структурные преобразования расчетной схемы (рис.5) оптимального регулятора перейдем к двухконтурной схеме оптимального регулирования объектом с учетом запаздывания, изображенной на рис.6. Передаточные функции контурных регуляторов будут, полностью определяться в соответствии с (6).

$$W_{p2}(p) = m \frac{\frac{n_4}{b_{34}} p + \left(\frac{n_4}{k_2} + n_3\right)}{p},$$

$$W_{p1}(p) = \frac{\frac{n_2}{b_{12}} p + \left(\frac{n_2}{k_1} + n_1\right)}{\frac{n_4}{b_{34}} p + \left(\frac{n_4}{k_2} + n_3\right)} \cdot \frac{1}{p},$$

$$W_{\phi3}(p) = \frac{\left(\frac{n_2}{k_1} + n_1\right)}{\frac{n_2}{b_{12}} p + \left(\frac{n_2}{k_1} + n_1\right)}.$$

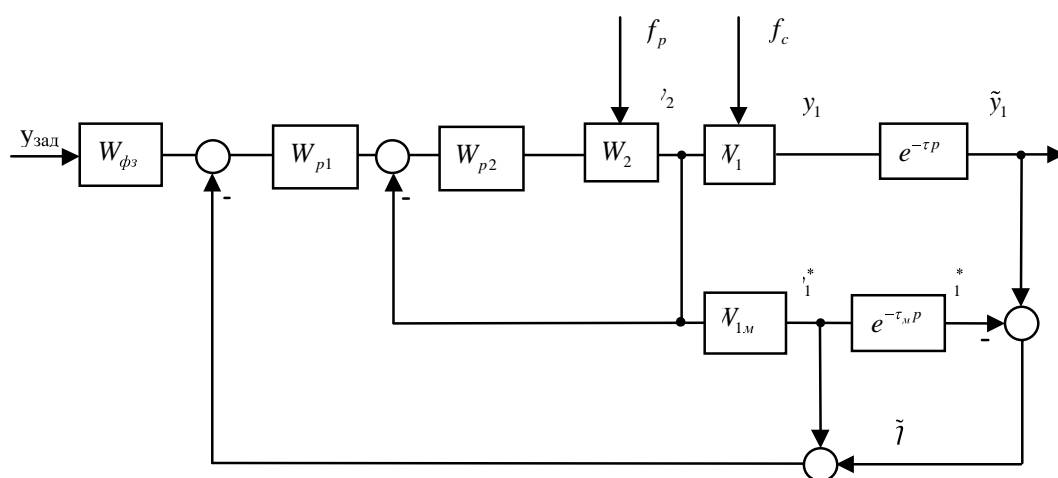


Рисунок 6 – Структурная схема двухконтурной системы управления с компенсацией запаздывания

В соответствии с структурной схемой (рис.6) была создана схема конфигурации двухконтурного алгоритма управления системой стабилизации обогащения доменного дутья кислородом, запрограммированного в микропроцессорном контроллере Ремиконт Р-130. В первом контуре был реализован импульсный ПД-регулятор расхода кислорода, который совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости реализует ПИ- алгоритм. Во втором контуре был сконфигурирован ана-

логовый корректирующий регулятор содержания кислорода в доменном дутье.

Переходные процессы по заданию производились путем изменения значения внутреннего задатчика каждого контура. Переходные процессы по возмущению f_p производились, при помощи быстрого закрытия отсечного клапана по расходу кислорода на рядом расположенной турбовоздуходувке №4. Это приводило к повышению давления технологического кислорода в общем кислородопроводе на 40 мм.вод.ст. Переходные процессы по возмущению f_c произвести в реальных условиях оказалось не возможным, поскольку это, прежде всего, сказывается на режим и качество работы кислородного блока.

На рисунке 7а приведены графики переходных процессов по заданию и возмущению f_p проходящих во внутреннем контуре. Корректирующий регулятор по содержанию кислорода в доменном дутье отключен. Здесь кривая 1 соответствует переходному процессу по заданию. Задание локальному регулятору расхода изменялось на 20% от предыдущего. Кривая 2 соответствует переходному процессу по возмущению со стороны регулирующего органа, путем изменения давления кислорода в общем кислородопроводе цеха.

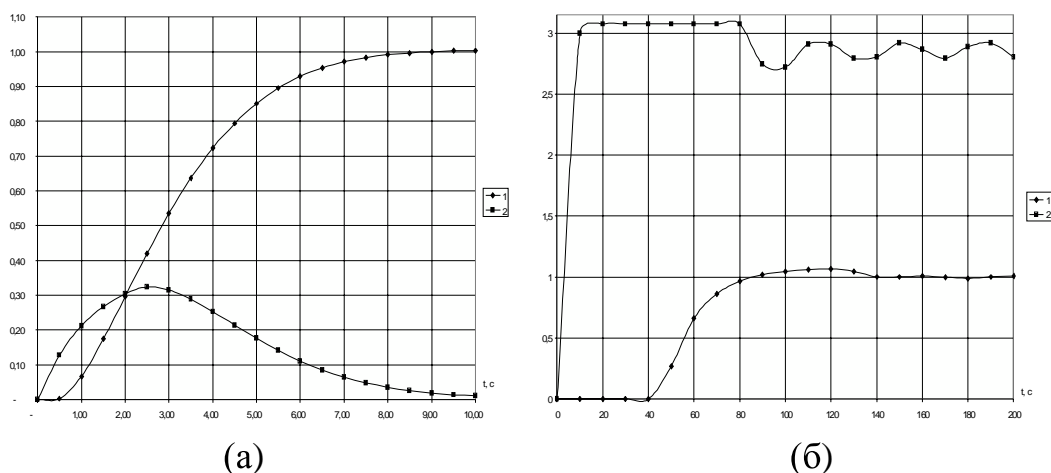


Рисунок 7 – Графики нормированных переходных процессов по расходу кислорода (а) по заданию (б)

На рис.7б приведены графики переходных процессов по заданию. Здесь кривая 1 соответствует переходному процессу по заданию выходной координаты по содержанию кислорода в доменном дутье. Кривая 2 – промежуточной координате – расходу технологического кислорода. Анализ графиков переходных процессов произведенных на реальном объекте показывает, что показатели качества, системы стабилизации обогащения доменного дутья технологическим кислородом, соответствуют заданным по экстремали. Экспериментальными исследованиями

установлено, что колебания содержания кислорода в дутье снизились до $\pm 0,7\%$.

Выводы и направления дальнейших исследований. Предложен метод синтеза каскадных систем управления объектами с запаздыванием, позволяющий решать следующие задачи: 1) компенсировать влияние запаздывания с помощью упредителя Смита; 2) добиваться желаемых динамических свойств системы; 3) упростить процедуру синтеза за счет использования экстремали назначенной траектории. В дальнейшем необходимо провести аналогичные исследования с целью распространения рекомендуемого метода на многоконтурные системы, с запаздыванием и без, с включением стабилизирующего устройства общего типа в цепь внутренних обратных связей.

Предлагается метод синтеза регулятора для многоконтурных объектов управления, обеспечивающих желаемые показатели качества замкнутой системы. Метод распространяется на объекты содержащие запаздывание в канале управления. Результаты иллюстрируются примером синтеза промышленной системы стабилизации обогащения доменного дутья кислородом.

The method of synthesis of a regulator for multiplanimetric objects of the management ensuring desirable parameters of quality of closed system is offered. The method is distributed to objects containing delay in the channel of management. The results are illustrated by an example of synthesis of industrial system of stabilization of enrichment of air by oxygen.

Библиографический список.

1. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. Изд. перераб. и дополн. М.: Наука, 1967, 423 с.

2. Боровиков М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики. Изд. Саратовского университета, 1980, 390с.

3. Садовой А.В., Сухин Б.В., Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. – К.: ИСИМО, 1996. –298с.

4. Дрючин В.Г., Ткачев Р.Ю., Денищик С.С. Синтез систем подчиненного регулирования. //Вестник МАНЭБ №1(37). Санкт-Петербург, 2001. С.76-78.