

ПРОСТЫЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Л.М. Яковис (СПбГПУ)

Анализируются трудности применения известных методов теории управления для типичных объектов промышленной автоматизации. Рассматривается метод расчета параметров типовых регуляторов для многосвязных объектов с различной инерционностью и запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий, базирующийся на комплексном применении теории управления и компьютерного имитационного моделирования¹.

Почему типовые регуляторы не уходят на пенсию

К типовым принято относить пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-дифференциальный (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) законы регулирования. Когда-то их абсолютное доминирование в промышленной автоматике объяснялось простотой технической реализации. Однако времена изменились, возможности управляющей вычислительной техники неизмеримо возросли, теория управления продвинулась в дали многомерных пространств, а простейшие типовые законы регулирования, причем большей частью в их одномерном варианте, как и прежде, остаются основным оружием в арсенале инженера "автоматчика". Проанализируем причины этой, казалось бы, странной ситуации.

Большую группу объектов промышленной автоматизации составляют ТП переработки материальных потоков в ту или иную конечную продукцию путем разного рода технологических операций (смешивание, разделение, нагрев, измельчение и т. д.). При этом наиболее распространенные и достаточно эффективно решаемые задачи автоматизации связаны с поддержанием расходов отдельных материалов (сырья, полупродуктов, топлива и т. д.) на заданных уровнях. Теоретической основой решения этих задач служит классическая теория управления одномерными динамическими системами. Прежде всего, именно здесь хорошо зарекомендовали себя типовые законы управления с обратной связью по отклонению выходной переменной от задания. При правильной настройке они наиболее рациональным образом сочетают быстроту реакции (П-составляющая) с осмотрительностью (И-составляющая) и элементами прогноза будущего (Д-составляющая).

Возникает, однако, вопрос — кто и каким образом должен формировать задания многочисленным дозирующим устройствам? Экономическая эффективность ТП в большой мере определяется тем, насколько рационально выбраны и насколько стабильно поддерживаются на выбранных уровнях режимные параметры процессов (температуры, давления, разрежения, химический состав и т. д.). Иногда удается расчленив сложную задачу совместного выбора и стабилизации характеристик процесса на ряд более простых задач автономного управления. Такая возможность возникает, когда изменением расхода одного материала можно привести в норму отклонение какого-либо одного по-

¹Статья подготовлена по материалам доклада [1]

*Что нужно, чтоб пирог испечь?
Мука, вы скажете, и печь,
Да сахар, яйца, молоко.
Испечь пирог совсем легко.
Лишь было б только для кого
Испечь его.*

Н. Нутрихина

казателя управляемого процесса, не влияя при этом на остальные стабилизируемые показатели (например, регулирование температуры подачи топлива или стабилизация тонкости помола воздействием на расход измельчаемого материала). В этих благоприятных вариантах также эффективно используются одномерные типовые регуляторы в контурах управления каскадных систем. Управляющими воздействиями выходных каскадов таких систем служат задания на расходы материалов, которые, в свою очередь, являются объектами стабилизации для предшествующих каскадов. К сожалению, значительная часть встречающихся в практике автоматизации процессов плохо поддается расчленению на независимые контуры, и тогда возникают задачи управления многосвязными динамическими объектами. Сложность управления такими многомерными объектами определяется наличием перекрестных связей, когда каждое из ряда управляющих воздействий вызывает изменение каждой из ряда выходных переменных.

Казалось бы, именно в подобной ситуации и должна применяться современная теория управления многомерными системами, однако в силу ряда особенностей промышленных объектов автоматизации ее основные методы плохо приспособлены для непосредственного применения на практике [2]. Почему?

Кроме уже упомянутых перекрестных связей к главным особенностям, затрудняющим анализ и синтез систем управления промышленными объектами, можно отнести запаздывание в каналах передачи управляющих воздействий, сложный и изменяющийся во времени характер динамических зависимостей выходных переменных от управляющих и возмущающих воздействий, случайный и изменяющийся во времени характер действующих на технологический объект неконтролируемых возмущающих воздействий, наличие жестких ограничений на изменение как выходных переменных, так и управляющих воздействий, значительные измерительные шумы в системе контроля переменных, характеризующих управляемые процессы.

Наиболее действенными методами современной теории управления являются методы анализа и синтеза линейных многомерных систем в пространстве состояний [3], однако они плохо приспособлены для учета запаздываний и жестких ограничений и, кроме того, обычно приводят к алгоритмам, использующим производные высоких порядков от контролируемых переменных, оценка которых с приемлемой точностью затруднена в условиях сильно зашумленных измерений. Нередко проблематичным оказывается и описание сложного технического объекта в форме линейных дифференциальных уравнений, которое необходимо для применения большинства доступных инженеру методов современной теории. Для многомерных систем с запаздыванием можно построить компенсатор, аналогичный упредителю Смита [4], где в характеристическом уравнении замкнутой системы так же, как и в одномерном случае, не будет членов с запаздыванием. Однако в отличие от одномерной задачи, где синтез компенсатора фактически сводится к прогнозу выхода на время запаздывания, в многомерном варианте компенсация связана с прогнозом некоторых "фиктивных" характеристик состояния в определенные моменты времени. Подобная искусственная конструкция затрудняет понимание работы, а соответственно и процесс настройки многомерного упредителя Смита. Необходимо отметить и тот факт, что запаздывания не будут влиять на устойчивость замкнутой системы лишь в том случае, когда модель управляемого процесса абсолютно адекватна ему. На практике это трудно осуществимо, поэтому компенсация запаздываний не является полной, и реальный эффект управления может оказаться существенно ниже расчетного.

В условиях, когда мощные методы современной теории управления "пасуют" перед "неприятными" особенностями реальных промышленных объектов, разработчики нередко вынуждены обращаться к проверенным десятилетиями практики автоматизации типовым регуляторам, поскольку они просто реализуются средствами проектирования SCADA-систем, не предъявляют жестких требований к знанию модели объекта управления и не требуют вычисления производных высокого порядка (наиболее распространенный ПИ-регулятор вовсе не требует вычисления производных), что чревато значительными погрешностями в условиях сильных измерительных помех.

Здесь разработчиков или наладчиков систем на объекте могут ждать, однако, серьезные трудности. Обычный способ введения связей от каждого из регулируемых параметров к соответствующему управляющему воздействию (автономная система регулирования) при наличии перекрестных связей и запаздываний в объекте может привести к снижению качества управления вплоть до неустойчивости из-за того, что каждый контур управления может создавать возмущения для других контуров. Введение же типовых обратных связей в "перекрестных" каналах приводит

к резкому усложнению задачи настройки параметров многомерного регулятора. В результате, судя по данным обследования фирмы Honeywell, лишь треть контуров промышленных систем управления работает с нормальными настройками — остальные с ослабленными настройками или практически разомкнутыми обратными связями [5].

Общее направление решения инженерных задач управления

В качестве перспективного направления сближения высокоматематизированной управленческой науки и прагматичной инженерной практики предлагается комплексное применение методов теории возмущений, идей декомпозиции, эвристических процедур и цифрового имитационного моделирования управляемых ТП [3, 6, 7]. Суть подхода состоит в том, что вначале рассматривается базовая упрощенная (идеализированная) постановка задачи. Отсутствие учета практически важных, но не очень принципиальных условий позволяет использовать для решения этой порождающей задачи известные методы теории управления. Затем полученное базовое решение модифицируется с учетом первоначально неучтенных особенностей реальной задачи на основе предшествующего опыта и с широким использованием имитационного моделирования для проверки инженерных "изобретательских" решений эвристического характера. Для облегчения подобных модификаций служит расчленение (декомпозиция) сложной исходной задачи на относительно самостоятельные более простые задачи. Попробуем применить данный общий подход для решения задачи расчета параметров типовых законов управления в многосвязных системах.

Идея комбинированного метода настройки многомерных типовых регуляторов

Оптимальная настройка параметров регуляторов заданного порядка и, в частности, типовых регуляторов для многомерных систем с перекрестными связями представляет собой одну из трудных задач теории управления. И здесь на помощь инженеру может прийти эвристика. Так, например, развивая результаты работы [8], можно предложить метод настройки многомерных ПИ и ПИД-регуляторов для управления многосвязными инерционными объектами с запаздыванием, который для определенности будем называть комбинированным. Рассматривается наиболее сложный случай, когда запаздывание и инерционность по различным каналам передачи управляющих воздействий могут иметь существенно различные значения. Суть метода состоит в том, что вектор управляющих воздействий формируется в каждый момент времени в виде линейной комбинации двух составляющих, каждая из которых представляет собой выход "порождающего" (то есть соответствующего в той или иной мере упрощенной структуре объекта) многомерного типового регулятора. Настройки первого типо-

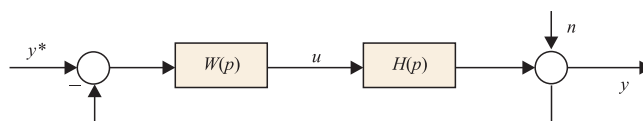
вого регулятора соответствуют объекту, полученному из исходного путем пренебрежения перекрестными связями. Второй типовой регулятор настраивается на управление объектом, совпадающим с исходным в статике, но отличающимся поведением в динамике за счет замены различных по каналам управления динамических операторов единым динамическим звеном с определенным образом сформированными параметрами. Настройки каждого из составляющих регуляторов просто рассчитываются на основе тех или иных известных методик одномерной теории управления, а скалярный коэффициент, определяющий вклад каждого из вспомогательных регуляторов в комбинированную структуру, предлагается искать либо аналитически, с помощью так называемой матрицы Бристоля [4], либо на имитационной модели управляемого процесса, осуществляя поисковую минимизацию целевой функции. Подобная комбинированная структура позволяет сочетать быстроту реакции автономного по каналам управления регулятора первого типа с возможностью учета перекрестных связей более "осторожным" регулятором второго типа.

Настройка одномерных типовых регуляторов по схеме динамической компенсации

Для конкретизации намеченной схемы необходимо предварительно выбрать какой-либо метод расчета параметров типовых одномерных регуляторов. Предложим для этой цели схему расчета, базирующуюся на широко известной идее динамической компенсации [3]. Суть метода, который можно назвать компенсационным, состоит в расчете таких параметров настройки регулятора, которые обеспечивают идентичность поведения замкнутой системы определенному эталонному образцу, который, в свою очередь, автоматически выбирается в зависимости от структуры модели объекта, заданного типа регулятора и заданного вида критерия оценки качества управления [9]. Ввиду широкого распространения в промышленной автоматике одномерных систем автоматического регулирования данная схема расчета может представлять и самостоятельный интерес.

Рассмотрим традиционную схему управления с отрицательной обратной связью (рисунок).

В такой системе выходная переменная $y(t)$ связана с задающим воздействием $y^*(t)$ и приведенным к вы-



ходу возмущающим воздействием $n(t)$ известным соотношением:

$$y = H_{\text{замк}}(p)n + [1 - H_{\text{замк}}(p)]y^*, \quad (1)$$

где передаточная функция замкнутой системы $H_{\text{замк}}(p)$ выражается через передаточные функции объекта управления $H(p)$ и регулятора $W(p)$ в виде:

$$H_{\text{замк}}(p) = \frac{1}{1 + H(p)W(p)}. \quad (2)$$

Отсюда можно заключить, что вид переходных процессов отработки возмущающих и задающих воздействий в замкнутой системе управления полностью определяется произведением передаточных функций объекта и регулятора. Следовательно, чтобы обеспечить заданное поведение некоторого управляемого объекта, идентичное поведению выбранного по тем или иным соображениям эталонного объекта $H^{\text{эм}}(p)$ при подаче на него управляющих воздействий от выбранного по тем или иным соображениям эталонного регулятора $W^{\text{эм}}(p)$, достаточно рассчитать передаточную функцию регулятора по формуле:

$$W(p) = \frac{H^{\text{эм}}(p)W^{\text{эм}}(p)}{H_{\text{об}}(p)}. \quad (3)$$

В соответствии с рассмотренной схемой компенсационного метода получены соотношения для расчета параметров типовых регуляторов для распространенных структур систем управления, а именно:

1) инерционного объекта первого порядка с запаздыванием, управляемого: а) ПИ- и б) ПИД- регулятором;

2) астатического инерционного объекта с запаздыванием, полученного последовательным соединением объекта типа (1а) с интегрирующим звеном, управляемого пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором.

При этом в качестве эталонной системы фигурирует безынерционный объект с чистым запаздыванием, управляемый И- или ПИ-регулятором (табл. 1).

Для определения численных значений коэффициентов $k_n^{\text{эм}}$ и $k_u^{\text{эм}}$, необходимых для расчета по форму-

Таблица 1

№ структуры	Объект $H(p)$	Тип регулятора	Эталонная система		Параметры рекомендуемого регулятора $W(p)$
			$H^{\text{эм}}(p)$	$W^{\text{эм}}(p)$	
1а	$\frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}$	ПИ	$e^{-p\tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T}{k} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{kp}$
1б	$\frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}$	ПИД	$e^{-p\tau}$	$k_n^{\text{эм}} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T + k_n^{\text{эм}}}{k} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{kp} + \frac{k_n^{\text{эм}}Tp}{k}$
2	$\frac{ke^{-p\tau}}{p(Tp+1)}$	ПД	$e^{-p\tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T}{k} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{k}$

Таблица 2

Тип критерия качества управления	№ структуры	Коэффициенты эталонного регулятора	
		$k_n^{эм}$	$k_u^{эм}$
Время переходного процесса при ступенчатых воздействиях	1а	–	0,507/τ
	1б	0,281	0,743/τ
	2	–	0,507/τ
Интегральный квадратичный показатель	1а	–	0,739/τ
	1б	0,453	0,796/τ
	2	–	0,739/τ
Интегральный модульный показатель	1а	–	0,589/τ
	1б	0,328	0,751/τ
	2	–	0,589/τ

лам, приведенным в последнем столбце табл. 1, следует воспользоваться соответствующими данными табл. 2. Они получены в результате поисковой минимизации трех употребительных критериев качества управления при имитации соответствующих эталонных систем в программной среде MATLAB-SIMULINK путем подачи ступенчатых возмущений на динамическую модель соответствующей замкнутой системы.

Изложенный метод дает возможности быстрого расчета параметров типовых регуляторов, причем найденные настройки обеспечивают устойчивую работу систем и приемлемое качество управления. Важно подчеркнуть, что предлагаемый способ позволяет по той же схеме использовать для расчета типовых регуляторов и другие инженерные показатели, например, минимизировать интегральный квадратичный критерий при ограничениях на перерегулирование и (или) колебательность переходных процессов. Сходная методика может быть использована для настройки типовых регуляторов применительно к инерционным объектам с запаздыванием, функционирующим в условиях случайных возмущений [10].

Комбинированный метод настройки многомерных типовых регуляторов

Рассмотрим задачу настройки многомерного регулятора, предназначенного для стабилизации многовходового объекта с l выходными переменными и l управляющими воздействиями. Полагая, что каждое управляющее воздействие оказывает влияние на каждую выходную переменную, будем рассматривать линейную динамическую модель объекта управления

$$y_i = \sum_{j=1}^l h_{ij}(p) u_j + n_i, \quad i, j = \overline{1, l}. \quad (4)$$

Будем также считать, что каждое управляющее воздействие формируется с учетом отклонений от задания каждой из выходных переменных по правилу

$$u_j = \sum_{i=1}^l w_{ij}(p)(y_i^* - y_i), \quad i, j = \overline{1, l}. \quad (5)$$

Тогда уравнения системы "объект – регулятор", записанные в векторно-матричной форме, примут вид:

$$y = H(p) u + n, \quad u = W(p) (y^* - y). \quad (6)$$

Далее конкретизируем задачу, полагая, что динамика по каналам передачи управляющих воздействий описывается наиболее распространенной в промышленной автоматике моделью инерционного звена с запаздыванием:

$$H(p) = [h_{ij}(p)], \quad h_{ij}(p) = \frac{K_{ij}}{T_{ij}p + 1} e^{-p\tau_{ij}}, \quad i, j = \overline{1, l}, \quad (7)$$

а для управления по отклонению используются либо ПИ-регуляторы:

$$W(p) = [w_{ij}(p)], \quad w_{ij}(p) = a_{ij} + b_{ij}/p, \quad i, j = \overline{1, l}, \quad (8)$$

либо ПИД-регуляторы:

$$W(p) = [w_{ij}(p)], \quad w_{ij}(p) = a_{ij} + b_{ij}/p + c_{ij}p, \quad i, j = \overline{1, l}. \quad (9)$$

Для характеристики качества управления будем, например, использовать интегральный квадратичный показатель, а для неконтролируемых возмущений n примем модель наиболее сложных для отработки ступенчатых воздействий.

В соответствии с изложенной схемой комбинированного метода сформируем закон управления в виде:

$$W(p) = \rho W^{(1)}(p) + (1 - \rho) W^{(2)}(p), \quad (10)$$

где $W^{(1)}(p)$ и $W^{(2)}(p)$ – передаточные матрицы вспомогательных регуляторов, имеющие ту же структуру, что и передаточные матрицы (8) и (9), а ρ – подлежащий выбору весовой коэффициент, причем $\rho \in [0, 1]$.

Диагональная передаточная матрица $W^{(1)}(p)$ составляется из передаточных функций автономных регуляторов, причем их параметры могут быть определены по любой из известных расчетных схем [3]. В частности, может быть использован рассмотренный компенсационный метод, когда параметры регулятора выбираются из условия соответствия передаточной функции замкнутой системы управления заданному эталонному образцу. Тогда, следуя изложенной методике, рекомендуется принять:

$$W^{(1)}(p) = \text{diag}\{w_{11}^{(1)}, \dots, w_{nn}^{(1)}\},$$

$$\text{где } w_{ii}^{(1)}(p) = a_{ii}^{(1)} + b_{ii}^{(1)}/p + c_{ii}^{(1)}p, \quad (11)$$

причем параметры автономных регуляторов определяются с использованием табл. 1 и 2 по формулам:

$$a_{ii}^{(1)} = 0,739 \frac{T_{ii}}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad b_{ii}^{(1)} = 0,739 \frac{1}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad c_{ii}^{(1)} = 0 \quad (12)$$

или

$$a_{ii}^{(1)} = \frac{1}{k_{ii}} (0,453 + 0,796 \frac{T_{ii}}{\tau_{ii}}),$$

$$b_{ii}^{(1)} = 0,796 \frac{1}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad c_{ii}^{(1)} = 0,453 \frac{T_{ii}}{k_{ii}} \quad (13)$$

для ПИ и ПИД-регуляторов соответственно.

Как уже говорилось, передаточная матрица $W^{(2)}(p)$ формируется для регулирования объекта, имеющего ту же матрицу статических коэффициентов усиления, что исходный объект (7), но единую динамику по всем каналам управления, то есть

$$H^{(2)}(p) = H(0) \frac{1}{T^{(2)}p + 1} e^{-p\tau^{(2)}}. \quad (14)$$

Динамические показатели в (14) определяются по правилу:

$$T^{(2)} = \min_{i,j} \{T_{ij}\}, \tau^{(2)} = \max_{i,j} \{\tau_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, l}. \quad (15)$$

Расчет параметров многомерного ПИД-регулятора $W^{(2)}(p)$ для объекта $H^{(2)}(p)$ по методу динамической компенсации приводит к соотношениям

$$W^{(2)}(p) = [H(0)]^{-1} (a^{(2)} + b^{(2)}/p + c^{(2)}p), \quad (16)$$

где $a^{(2)} = 0,739 \frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}}$, $b^{(2)} = 0,739 \frac{1}{\tau^{(2)}}$, $c^{(2)} = 0$ или

$$\begin{aligned} a^{(2)} &= 0,453 + 0,796 \frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}}, \\ b^{(2)} &= 0,796 \frac{1}{\tau^{(2)}}, c^{(2)} = 0,453 T^{(2)} \end{aligned} \quad (17)$$

для ПИ и ПИД-регуляторов соответственно.

Выбор $T^{(2)}$ и $\tau^{(2)}$ по правилу (15) соответствует минимизации коэффициентов усиления регулятора $a^{(2)}$, $b^{(2)}$ и $c^{(2)}$, что, в свою очередь, ведет к повышению "осторожности" при формировании управляющих воздействий.

Что касается определения весовых коэффициентов ρ в комбинированном регуляторе (10), то оно может осуществляться различным образом. Первый из рассматривавшихся способов предполагает использование для расчета ρ так называемой матрицы Бристоля, которая характеризует степень связности многомерного объекта [5]:

$$\lambda = [\lambda_{ij}], \text{ где } \lambda_{ij} = [H(0)]_{ij} [H(0)^T]^{-1}_{ji}, \quad i, j = \overline{1, l}. \quad (18)$$

Руководствуясь тем, что данная матрица имеет тем большую диагональную доминантность, чем меньше влияние перекрестных связей, можно принять для расчета ρ правило:

$$\begin{aligned} \rho &= \|\lambda_{diag}\| / \|\lambda\|, \text{ где } \lambda_{diag} = \text{diag}\{\lambda_{11}, \dots, \lambda_{ll}\}, \\ \|\lambda_{diag}\| &= \sum_{i=1}^l |\lambda_{ii}|, \|\lambda\| = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l |\lambda_{ij}|. \end{aligned} \quad (19)$$

В соответствии с этим правилом доля автономного регулятора $W^{(1)}(p)$ во взвешенной сумме (10) тем выше, чем слабее перекрестные связи в объекте управления.

Другой способ определения значения ρ заключается в поиске данного весового коэффициента из условия оптимизации того или иного показателя качества управления объектом (7) при использовании регулятора (10). Такую оптимизацию удобнее всего производить путем имитационного моделирования замкнутой системы управления с применением какого-либо из известных пакетов прикладных программ, например, SIMULINK.

Для опробования предложенных способов настройки параметров многомерных типовых регуляторов был выполнен ряд численных экспериментов на имитационной модели применительно к двумерному объекту типа (7), то есть при $l = 2$. При этом имитировалась работа замкнутой системы управления при различных соотношениях коэффициентов усиления, инерционности и запазды-

Таблица 3

№ объекта	Характеристики объекта управления			Весовой коэффициент ρ	
	Наименование	Значения		Интегральный квадр. показатель	
1	Коэффициенты усиления	5	2	Моделирование	Матрица Бристоля
		3	10		
	Постоянные времени	5	4	$\frac{0,802}{0,0483}$	$\frac{0,893}{0,0484}$
		6	3		
	Запаздывания	3	2		
		5	4		
2	Коэффициенты усиления	2	2	Моделирование	Матрица Бристоля
		0	2		
	Постоянные времени	5	4	$\frac{0,950}{0,0664}$	$\frac{1,000}{0,0665}$
		6	3		
	Запаздывания	3	2		
		5	4		
3	Коэффициенты усиления	-2	2	Моделирование	Матрица Бристоля
		4	12		
	Постоянные времени	5	4	$\frac{0,184}{0,0781}$	$\frac{0,750}{0,1316}$
		6	3		
	Запаздывания	3	2		
		5	4		

вания по разным каналам управления. Расчет коэффициентов ПИ и ПИД-регуляторов выполнялся по формулам (11 – 17), а весовой коэффициент ρ определялся двумя рассмотренными выше способами. Во всех вариантах рассчитанные по предлагаемой методике регуляторы обеспечивали устойчивую работу замкнутой системы и отработку приведенных к выходу ступенчатых возмущений. Некоторые результаты этих имитационных экспериментов, относящиеся к управлению с помощью ПИ-регуляторов, представлены в табл. 3.

Из данных таблицы видно, что в случае диагональной доминантности матрицы статических коэффициентов усиления (объект 1, слабые перекрестные связи) и в случае перекрестных связей лишь по одному каналу управления (объект 2) расчет обоими способами дает близкие результаты, однако при сильных перекрестных связях по двум каналам управления (объект 3) результаты могут ощутимо различаться. На основании приведенных и иных результатов исследования можно сделать вывод, что существенно более простой способ сугубо аналитических расчетов, основанный на использовании матрицы Бристоля, может применяться для ориентировочных оценок параметров регуляторов, в то время как магистральным направлением является оптимизация ρ на основе имитационного моделирования. Именно оно позволяет максимально приблизить модель управляемого процесса к реальности, учесть всевозможные ограничения, исследовать чувствительность системы к неизбежным неточностям математического описания. Вся процедура расчета параметров многомерного регулятора, включая сравнение автоматически запускаемых моделей по заданному критерию и отбор наилучшего взвешивающего коэффициента ρ , может быть полностью автоматизирована, например, путем ее реализации в программной среде MATLAB-

SIMULINK. Наконец, именно в таком варианте, когда поисковой оптимизации подлежит всего один параметр, метод хорошо приспособлен к подстройке на действующем объекте.

Модификации комбинированной схемы настройки типовых регуляторов

Можно предложить несколько модификаций комбинированного метода, нацеленных на улучшение характеристик рассчитываемых с его помощью регуляторов. Одна из них заключается в том, что при формировании составляющей $W^{(2)}(p)$ используются не ПИ или ПИД-регуляторы с определенным образом рассчитываемыми настройками, а И-регулятор с оптимизируемым коэффициентом усиления. Для этого в (16) полагаются равными нулю коэффициенты $a^{(2)}$ и $c^{(2)}$, а коэффициент усиления И-регулятора $b^{(2)}$ определяется путем поисковой оптимизации с применением имитационного моделирования. В свою очередь, такая оптимизация может выполняться в двух вариантах: поочередно, когда вначале ищется значение $b^{(2)}$, оптимизирующее работу системы управления для исходного объекта (7), а затем уже осуществляется поиск оптимального значения p , или одновременно, когда осуществляется двумерный поиск оптимальной пары $b^{(2)}$ и p для исходного объекта (7), замкнутого комбинированным регулятором (10). Другая модификация заключается в том, что скалярный параметр p в ключевом соотношении (10) заменяется диагональной матрицей P . Все модифицированные схемы увеличивают размерность задачи поисковой оптимизации весовых коэффициентов, но за счет этого происходит повышение качества управления.

Заключение

Преимущества комбинированной схемы настройки параметров типовых регуляторов, в особенности для многосвязных объектов, заключаются в резком снижении объема перебора вариантов при поисковой оптимизации параметров типовых регуляторов, а также — в принципиальных возможностях всестороннего учета особенностей реальных объектов (неточность и нелинейный характер моделей, ограничения на переменные, случайный характер возмущений) и оптимизации параметров регуляторов по различным критериям качества управления.

Леонид Моисеевич Яковис — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Контактные телефоны: (812) 759-71-21, 950-49-39. E-mail: leonid@yakovis.com

Имитационное исследование рассмотренного в данной работе комбинированного метода управления для двумерных объектов с различными соотношениями динамических характеристик, подверженных как детерминированным, так и случайным возмущениям в вариантах точного и неточного знания характеристик объекта подтвердило его работоспособность. Вместе с тем, необходимы дальнейшие модельные исследования и "обкатка" на практике, и автор заинтересован в сотрудничестве в этих направлениях, поскольку в соответствии с эпиграфом хотел бы, чтобы испеченный им пирог был востребован.

Список литературы

1. Яковис Л.М. Расчет типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Материалы 31 Международного семинара "Автоматизация. Программно-технические средства. Системы. Применения". М.: ИПУ РАН, 2-6 апреля 2007.
2. Перельман И.И. Динамическая оптимизация в АСУТП на базе алгоритмов условного прогнозирования // Автоматика и телемеханика. 1978. № 9.
3. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления // М., Наука, 1986.
4. Рей У. Методы управления технологическими процессами // М., Мир, 1983.
5. Штейнберг Ш.Е., Серезин Л.П. и др. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №7.
6. Яковис Л.М. Имитационное моделирование — ключ к решению задач управления сложными технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. 2006. №7.
7. Яковис Л.М. Как сблизить теорию и практику управления технологическими процессами // Сборник докладов 4-й Всероссийской научной конференции "Управление и информационные технологии", СПб., 2006.
8. Кустов Б.С., Яковис Л.М. Комбинированный метод расчета многомерных пропорционально-интегральных регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // XXXIII Неделя науки СПбГПУ, Ч. IV, Изд-во СПбГПУ, 2005.
9. Кондрат А.С., Яковис Л.М. Компенсационный метод настройки регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // XXXII Неделя науки СПбГПУ, Ч. IV, СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.
10. Меницкая Н.И., Яковис Л.М. Компенсационный метод настройки регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием, подверженных случайным возмущениям // XXXIV Неделя науки СПбГПУ: Ч. IV, СПб., Изд-во СПбГПУ, 2006.

Главная промышленная ярмарка в России

23-26 октября 2007 г. в Москве на ВВЦ состоится VI Всероссийская (Федеральная) промышленная ярмарка и I Всероссийский конгресс "Промышленная политика Российской Федерации", организаторами которой являются Правительство РФ, Министерство промышленности и энергетики РФ, Министерство экономического развития и торговли РФ и Министерство регионального развития РФ.

Концепция ярмарки представляет собой сочетание взаимосвязанных специализированных выставок и тематических

экспозиций. Самым значимым событием VI Всероссийской (Федеральной) промышленной ярмарки станет выставка "Интертехсалон 2007". В этом году в "Интертехсалоне" объединятся в единое целое: технологии автоматизации производственных процессов, современные информационные технологии и роботизированные интеллектуальные системы. Получит дальнейшее развитие тематическое направление, посвященное аэрокосмическим технологиям, автоматизации и информационным технологиям в аэрокосмической отрасли.

[Http://www.miif.ru](http://www.miif.ru)