



## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Л.М. Яковис (СПбГПУ), К.В. Спорягин (СПбГИ(ТУ))

*Рассматривается задача расчета параметров типовых регуляторов для ТП с несколькими управляющими воздействиями и несколькими выходными показателями. Предлагается автоматизированный способ настройки ПИ- и ПИД-регуляторов в рамках централизованной структуры системы управления для динамических объектов произвольной размерности с перекрестными связями и различным запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий.*

*Ключевые слова: многосвязный объект управления, типовой регулятор, программный комплекс, имитационное моделирование, запаздывание.*

Одной из важных проблем современных технологий является поддержание основных показателей ТП на оптимальном уровне. Этому препятствуют многочисленные возмущающие факторы, большей частью обусловленные истощением кондиционных природных ресурсов. Нестабильность свойств полупродуктов и продукции, в свою очередь, препятствует приближению средних значений показателей процессов к экономически выгодным границам — отсюда повышенное энергопотребление, заниженные производительность и качество продукции [1]. Например, при производстве цемента из-за нестабильности химического состава сырьевой смеси «пляшет» активность (то есть, фактически, прочность) цемента, что вынуждает производителя создавать запас прочности для выполнения гарантийных обязательств перед потребителем. Важно, однако, что этот запас создается ценой значительных экономических потерь, связанных со снижением массовой доли дешевых добавок типа доменного шлака [2].

Действенным средством повышения стабильности показателей является автоматическое и автоматизи-

рованное управление интенсивностью материальных и энергетических потоков, а также режимными параметрами ТП. Так, при обжиге цементной сырьевой смеси важно поддерживать оптимальный температурный профиль по длине печи, воздействуя на расходы обжигаемого материала, топлива, подаваемого в печь воздуха, а также на скорость вращения печи. Сложность, однако, состоит в том, что каждое управляющее воздействие в разной степени и с разной динамикой влияет на все стабилизируемые переменные ТП. Статья посвящена достаточно простым в реализации и вместе с тем универсальным автоматическим способам решения проблемы стабилизации многомерных ТП с применением типовых регуляторов [3].

### От управления фрагментами ТП к управлению процессом в целом

На рис. 1 представлена типичная схема управляемого ТП. Она включает объект управления, находящийся под действием как ряда управляющих сигналов, так и ряда приведенных к выходу неконтролируемых возмущений. В общем случае каждый управляемый вход оказывает влияние на каждый контролируемый выход, подлежащий стабилизации на требуемом уровне. В силу сложностей математического описания динамики представленного объекта многосвязного регулирования и трудностей при разработке способов формирования управляемых входов чаще всего ограничиваются разработкой несвязанных между собой одноконтурных автоматических систем стабилизации входных управляющих воздействий (интенсивности материальных и энергетических потоков, а также режимные параметры ТП) на уровнях, которые задает технолог-оператор АСУТП.

Таким образом, наиболее важные с позиций технологического и экономического эффекта функции системы управления нередко остаются за человеком, который оказывается один на один со сложной задачей выбора заданий для представленных на рис. 1 одномерных контуров управления. Как в шахматах

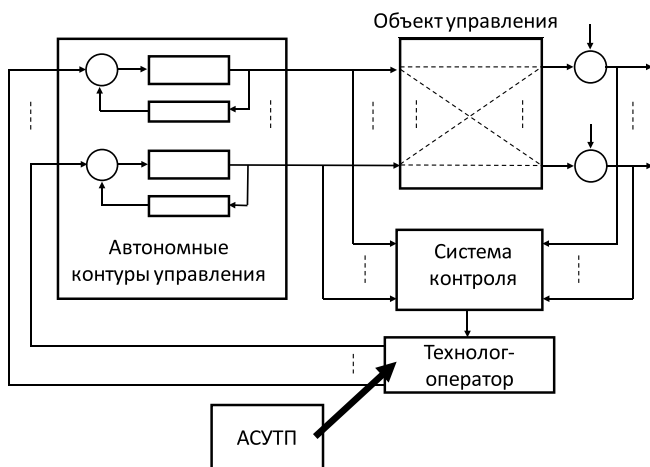


Рис. 1. Типичная схема управляемого ТП

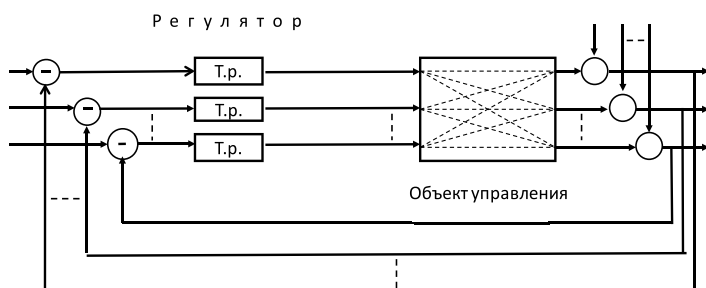


Рис. 2. Децентрализованная структура системы управления

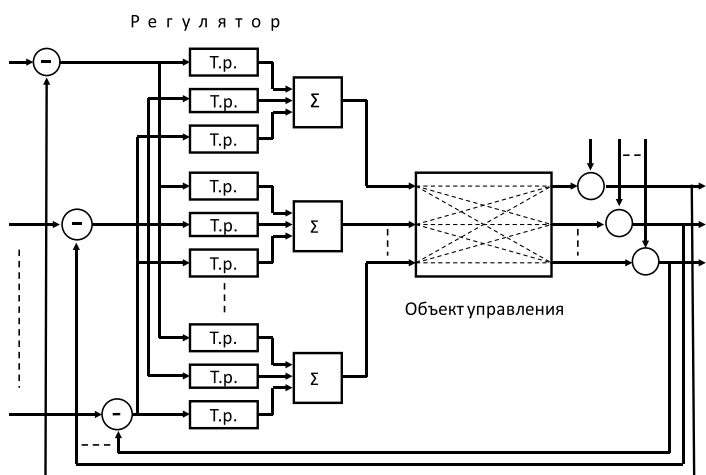


Рис. 3. Централизованная структура системы управления

гроссмейстеры встречаются гораздо реже, чем игроки первого разряда, так и на производстве средних по квалификации технологов-операторов гораздо больше, чем асов, способных удерживать вблизи оптимальных значений ряд показателей ТП в условиях случайных возмущений и взаимовлияния различных переменных. Не умея решить эту сложную задачу, «средний» оператор ТП чаще всего выбирает наиболее осторожную тактику минимального вмешательства в кое-как налаженный ТП. При этом возможны существенные потери количества и качества продукции. Важная перспективная задача, о которой пойдет речь в дальнейшем, состоит в том, чтобы перейти от автоматического управления отдельными фрагментами ТП (большей частью поддержание заданных технологом-оператором значений расходов вводимых в процесс веществ и энергии) к автоматическому управлению ТП в целом, включая выработку системой управления заданий автономным контурам управления. Эти задания должны изменяться таким образом, чтобы выходные показатели ТП были максимально близки к экономически оптимальным режимным значениям.

В ряде предшествующих публикаций [1, 4] говорилось о том, что мощные методы современной математической теории управления плохо приспособлены для решения практических задач, относящихся к ТП, в силу ряда их особенностей как объектов управления. К таким особенностям, прежде всего, относятся явления информационного и транспортного запаздывания, значительные измерительные шумы, наличие жестких

ограничений на область изменения различных переменных, нестандартные критерии качества управления. В этих условиях для решения задач управления ТП в последнее время рекомендуются методы так называемого усовершенствованного управления (Advanced Process Control — APC) [5]. Они предусматривают включение в алгоритм управления работающих в реальном и ускоренном времени динамических моделей управляемого процесса. Такие системы достаточно сложны и дороги для реализации и последующего сопровождения. Вместе с тем в мировой практике широко и в целом успешно применяются давно известные типовые законы управления, то есть ПИ- и ПИД-регуляторы [3]. Учитывая это обстоятельство, будем формировать алгоритмы управления на основе типовых регуляторов. Продолжая рассмотрение системы, приведенной на рис. 1, для упрощения восприятия не будем показывать на схемах блоки автономных контуров управления и системы контроля, хотя их присутствие подразумевается в любой реальной системе.

#### Децентрализованное и централизованное управление ТП

Наиболее проста в структурном отношении система децентрализованного управления, представленная на рис. 2. Здесь каждое управляющее воздействие формируется в зависимости от отклонения соответствующей выходной переменной от ее заданного значения. Если перекрестные связи в объекте управления отсутствуют или слабы, то каждый типовой регулятор (Т.р.) может настраиваться независимо от других. Для этого может использоваться любая из известных расчетных методик, например, рассмотренный в [6] компенсационный метод, который позволяет учитывать ограничения на управляющие воздействия и оптимизировать переходные процессы по различным инженерным показателям, учитывающим колебательность и длительность переходных процессов. Можно применить и близкий по смыслу метод внутренней модели (ИМС), который часто упоминается в зарубежной литературе [7].

При сильных перекрестных связях тактика независимых расчетов типовых регуляторов может привести к неустойчивости замкнутой системы, так как каждый контур управления может создавать дополнительные возмущения для остальных контуров. В этом случае приходится использовать существенно более сложные способы расчета типовых регуляторов. Общий смысл предлагаемых расчетных процедур состоит в замене модели объекта некоторой «эквивалентной» динамической моделью, тем или иным образом учитывающей влияние других контуров [3]. Определенным недостатком таких методов является отсутствие гарантии устойчивости многомерной замкнутой системы и необходимость выбора значений ряда коэффициентов.

**Комбинированный метод настройки типовых регуляторов в рамках централизованной структуры управления**

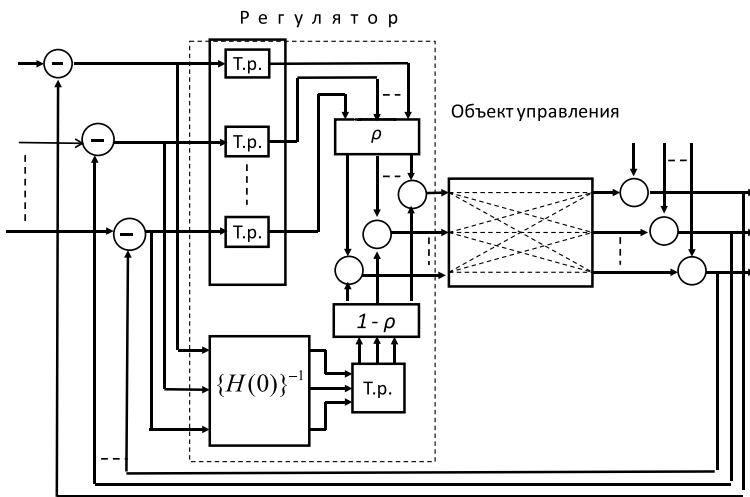


Рис. 4. Система с комбинированным многомерным типовым регулятором

В недалеком прошлом децентрализованная структура регулирования ТП имела то важное преимущество, что, действуя автономно, каждый контур управления мог быть реализован индивидуальным контроллером. Это обеспечивало высокую надежность системы, так как при отказе какого-либо контроллера «страдала» лишь одна из многочисленных веток управления. По мере повышения надежности управляющей техники и повсеместного распространения двухуровневых технических структур с координирующей SCADA-системой на верхнем уровне и микропроцессорными контроллерами на нижнем децентрализованная структура стала терять свои преимущества. На этом фоне существенное значение приобретают ее структурные недостатки. Ведь если управляющее воздействие оказывает влияние на все выходные переменные, то естественно при выработке этого воздействия учитывать отклонения от заданий не одной, а всех переменных. Именно таким образом устроена централизованная структура, схема которой показана на рис. 3.

Сложность реализации централизованной структуры, базирующейся на типовых регуляторах, заключается в необходимости настройки большого числа параметров типовых законов управления, а именно: для объекта с  $M$  управляющими входами и  $N$  стабилизируемыми выходными показателями при использовании ПИ-регуляторов требуется настроить  $2M \times N$ , а при использовании ПИД-регуляторов —  $3M \times N$  коэффициентов. Например, для объекта управления с тремя входами и тремя выходами для настройки ПИД-регуляторов необходимо определить 27 коэффициентов. Теория не дает аналитических способов параметрической оптимизации многомерных типовых регуляторов, а поисковая оптимизация большого числа параметров с применением имитационного моделирования сопряжена с большими затратами времени и, как показывает опыт подобных расчетов, не гарантирует положительного результата. В таких условиях приходится прибегать к упрощенным приближенным решениям.

В ряде предшествующих работ [6, 8] был предложен и исследован так называемый «комбинированный» метод настройки типовых регуляторов для широкого класса многомерных объектов управления с перекрестными связями и запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий. Предполагается, что передаточная матрица объекта  $H(p)$  содержит элементы  $h_{ij}(p)$ , каждый из которых представляет собой последовательное соединение устойчивой дробно-рациональной передаточной функции  $\tilde{h}_{ij}(p)$  со звеном запаздывания  $e^{-p\tau_{ij}}$ . Задача настройки типовых регуляторов сводится к разработке методов расчета матриц  $A$ ,  $B$  и  $C$ , определяющих параметры передаточ-

ной матрицы многомерного ПИ- или ПИД-регулятора  $W(p) = A + B / p + Cp$  (для ПИ-регулятора  $C = 0$ ).

Идея метода для объекта с квадратной передаточной матрицей ( $M = N$ ) заключается в линейной комбинации определенным образом сформированных типовых регуляторов с децентрализованной и централизованной структурой (рис. 4). В соответствии с [6] закон управления имеет вид:

$$W(p) = rW^{(1)}(p) + (1-r)W^{(2)}(p),$$

где  $W^{(1)}(p)$  и  $W^{(2)}(p)$  — передаточные матрицы вспомогательных типовых регуляторов, а  $\rho$  — подлежащий выбору весовой коэффициент, причем  $\rho \in [0, 1]$ .

Диагональная передаточная матрица  $W^{(1)}(p)$  соответствует многомерному типовому регулятору, призванному стабилизировать объект  $H(p)$  в рамках децентрализованной структуры. В наиболее простом варианте  $W^{(1)}(p)$  стабилизирует вспомогательный объект  $H^{(1)}(p)$ , полученный из исходного пренебрежением перекрестными связями. В более сложном варианте перекрестные связи учитываются косвенным образом одним из известных способов, о которых говорилось в предыдущем разделе.

Передаточная матрица  $W^{(2)}(p)$  предназначена для стабилизации вспомогательного объекта  $H^{(2)}(p)$ , имеющего ту же матрицу статических коэффициентов усиления  $H(0)$ , что исходный объект, но единую динамику по всем каналам управления. Расчет параметров многомерного централизованного типового регулятора  $W^{(2)}(p)$  для объекта  $H^{(2)}(p)$  по методу динамической компенсации приводит к соотношениям:

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

где «свободные» скалярные параметры  $a^{(2)}$ ,  $b^{(2)}$ ,  $c^{(2)}$  для ПИД-регулятора или параметры  $a^{(2)}$ ,  $b^{(2)}$  для ПИ-регулятора подлежат определению тем или иным способом.

Рассмотрена модификация метода для объектов с прямоугольной передаточной матрицей, у которых

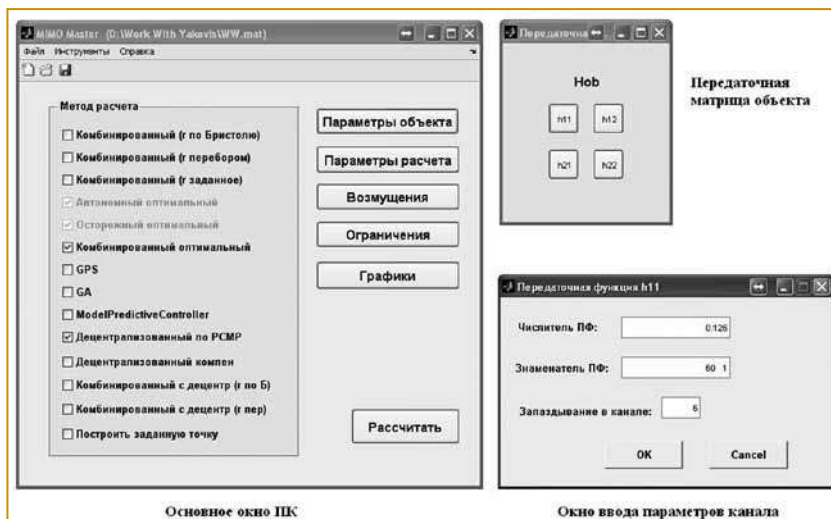


Рис. 5. Основное окно ПрК и окна ввода передаточной матрицы объекта

управляющих воздействий меньше, чем выходных переменных ( $N > M$ ). В этом варианте  $\rho=0$  и обращение матрицы заменяется псевдообращением [8].

Таким образом, рассмотренная методика базируется на комбинации двух способов настройки многомерных типовых регуляторов. Первый способ упрощает настройку за счет пренебрежения перекрестными связями, а второй — учитывает перекрестные связи в статике, однако упрощает структуру динамической части многомерного типового регулятора. Можно показать, что сконструированный таким образом комбинированный регулятор обладает свойствами структурной устойчивости и грубости, то есть всегда можно найти значения его настраиваемых параметров, при которых замкнутая система управления будет устойчивой и мало чувствительной к погрешностям модели объекта управления.

#### Программный комплекс MIMO Master

Для реализации комбинированного метода был разработан программный комплекс (ПрК) **MIMO Master** [9]. В качестве среды разработки ПрК используется стандартное средство анализа и моделирования динамических систем MATLAB & Simulink. Такой выбор позволяет качественно и быстро решать множество задач с использованием встроенных функциональных возможностей среды разработки (например, задачи идентификации объекта, реализация поисковых процедур и т.п.). Разработанный интерфейс ПрК и содержащаяся внутри него алгоритмическая «начинка» позволяют пользователю ввести параметры объекта управления или определить их по массивам значений разгонных характеристик, выбрать один или несколько употребительных показателей качества управления, определить рациональную структуру децентрализованной части регулятора, учесть ограничения на управляющие воздействия, выполнить все необходимые расчеты и процедуры численной оптимизации, увидеть на графиках переходные процессы в замкнутой системе управления, не имея дело непосредственно с универсальной средой проектирования системы.

**Формирование динамической модели объекта управления.** Динамика много-связного объекта управления задается элементами передаточной матрицы. ПрК позволяет рассчитывать типовые регуляторы для объектов с любым числом управляющих и выходных переменных. Каждый элемент должен представлять собой устойчивую дробно-рациональную передаточную функцию произвольного порядка с запаздыванием. Ввод параметров объекта осуществляется в окне ввода параметров объекта (рис. 5).

Если введенная пользователем передаточная функция выше первого порядка, то по окончании ввода автоматически запускается подпрограмма, аппроксимирующая введенную пользователем функцию в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Для аппроксимации используется стандартная функция MATLAB *pet*.

Если пользователь заранее не знает параметры передаточной матрицы объекта, то он может идентифицировать их по разгонным характеристикам. Данные аппроксимации применяются для расчета многомерного регулятора аналитическим способом, а также для формирования начальных приближений при использовании поисковых процедур.

**Формирование исходных данных для расчетов.** Первое, с чем должен определиться пользователь, — это тип регулятора, а именно: ПИ- или ПИД-регулятор. При формировании исходных данных для расчета пользователь выбирает также один из общепринятых показателей качества управления: интегральный квадратичный критерий (ИКК); интегральный квадратичный критерий при ограничениях на показатели перерегулирования и степень затухания колебаний (ИККогр); интегральный модульный критерий (ИМК); длительность переходного процесса.

Преодоление значительной инерционности при компенсации действующих на объект возмущений требует сильных управляющих воздействий, которые могут выходить за допустимые границы. В рассматриваемом ПрК, в отличие от большинства существующих методик расчета параметров законов регулирования с обратной связью, учитываются допуски на величину управляющих воздействий [8], и эти допуски входят в число исходных данных для расчетов.

Регуляторы рассчитываются на наиболее сложные для компенсации ступенчатые возмущения, причем пользователем указывается их максимальная (по модулю) величина. В многомерном объекте качество управления зависит также и от комбинации знаков ступенчатых возмущений, поэтому настройки регуляторов определяются по принципу минимаксного подхода, то есть ПрК ищет настройки, которые дают лучшее значение критерия каче-

ства управления при самых неблагоприятных сочетаниях знаков возмущений.

**Расчет параметров многомерных типовых регуляторов.** При расчете настроек многомерного регулятора пользователю доступны вычислительные процедуры двух типов. К первому типу относятся пять способов расчета, объединенных общей идеей рассмотренного выше комбинированного метода. В одном из вариантов все настройки комбинированного алгоритма управления формируются аналитически. В другом варианте аналитические способы настройки вспомогательных многомерных регуляторов  $W^{(1)}(p)$  и  $W^{(2)}(p)$  сочетаются с поисковым способом настройки весового коэффициента  $\rho$ , который находится в процессе многократной имитации замкнутой системы управления в среде Simulink из условия минимизации заданной целевой функции. В остальных вариантах параметры вспомогательных многомерных регуляторов также определяются численно в результате поисковой оптимизации на имитационной модели. Простота настройки рассмотренных алгоритмов управления определяется малым числом совместно оптимизируемых параметров, причем для их расчета не требуются сложные аналитические методы и поисковые процедуры — достаточно схем простого перебора в рамках компьютерного имитационного моделирования.

Ко второму типу способов настройки регуляторов относятся две вычислительные процедуры, где все параметры многомерных ПИ- или ПИД-законов управления определяются «в лоб» путем поисковой оптимизации по одному из выбранных пользователем инженерных критериев. К поисковым методам относятся: General Pattern Search, представляющий собой разновидность симплексного метода, и генетический алгоритм. Для первого метода используется стандартная функция MATLAB patternsearch, для второго — стандартная функция ga. Разумеется, в силу высокой размерности задач поисковой оптимизации алгоритмы настройки, относящиеся к данной группе, обладают существенно меньшим быстродействием, чем варианты комбинированного метода, причем длительность расчетов быстро возрастает с ростом размерности объекта управления. Вместе с тем в принципиальном плане (при использовании значительных ресурсов времени на поиск настроек) они могут давать лучшие результаты.

**Имитационное моделирование.** ПрК предусматривает функции имитационного моделирования замкнутой системы управления. Выполнив перечисленные выше расчетные процедуры, пользователь имеет возможность изменить характеристики возмущающих воздействий, объекта и регулятора и с помощью развитых средств мониторинга проверить работу системы в самых разных условиях. Данная функция имеет большое значение, обеспечивая возможности проверки чувствительности системы к погрешностям определения структуры и параметров модели объекта управления. Другое применение функции имитационного

моделирования — анализ настроек регуляторов, полученных какими-либо иными методами, например, найденных экспериментальным путем. После расчета пользователь имеет возможность изучить вид переходных процессов по графикам. Следует подчеркнуть, что в ходе имитационных расчетов и поисковых процедур используются исходные динамические модели, а не их упрощенные аппроксимации.

**Архивация результатов.** У пользователя есть возможность сохранить полученные результаты в файл Excel. Архивируются такие данные, как дата и время расчета, параметры объекта, метод расчета, настройки регулятора, значения критериев качества управления, величина возмущений.

**Тестирование ПрК МИМО-Master.** Для проверки работоспособности и эффективности ПрК был выполнен большой объем работ по его тестированию и сравнительному анализу. В частности, тестированию были подвергнуты 10 многосвязных объектов различной размерности, рассмотренные в [3]. В их числе четыре объекта размерности 2x2 (TS, WB, VL, WW), три объекта размерности 3x3 (OR, T1, T4) и три объекта размерности 4x4 (DL, A1, A2). Все эти объекты моделируют динамику дистилляционных колонн. Кроме того, был рассмотрен объект 3x3, относящийся к процессу приготовления цементной сырьевой смеси [10]. Учитывая, что авторам не известны полностью формализованные методы синтеза централизованных типовых регуляторов, типовой многомерный централизованный регулятор, рассчитанный комбинированным методом, сравнивался с децентрализованными типовыми регуляторами, рассчитанными по предложенной в [3] методике, объединяющей так называемый dRI-анализ интенсивности перекрестных связей с упоминавшимся ИМС-методом настройки автономных контуров управления (в ПрК МИМО Master этот метод реализован под названием «децентрализованный по РСМР» или коротко ДР). Сравнение показало, что централизованный многомерный регулятор, рассчитанный с применением поисковых процедур комбинированного метода (КО-регулятор), во всех случаях обеспечивает лучшее качество управления (оно оценивалось по ИКК), причем в среднем он превосходит ДР-регулятор в 1,6 раза.

Рассмотрим для примера результаты тестирования ПрК МИМО Master применительно к объекту 2x2 WW (Wardle and Wood) из [3], имеющему передаточную матрицу:

$$H(p) = \begin{bmatrix} \frac{0,126e^{-6p}}{60p+1} & \frac{-0,101e^{-12p}}{(48p+1)(45p+1)} \\ \frac{0,094e^{-8p}}{38p+1} & \frac{-0,12e^{-8p}}{35p+1} \end{bmatrix}$$

К выходам объекта прикладываются единичные ступенчатые возмущения разных знаков. При этом возникают переходные процессы по управляющим и выходным переменным (рис. 6).

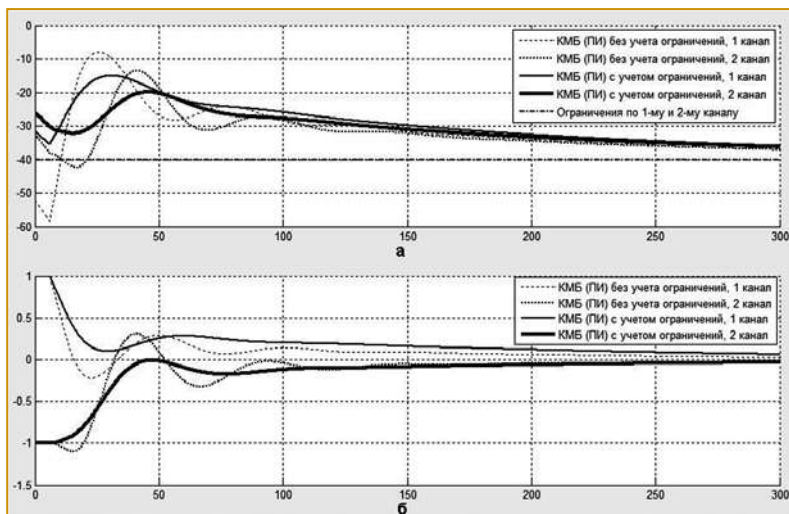


Рис. 6. Управляющие воздействия (а) и выходные переменные (б) в замкнутой системе с регулятором АО (пунктирные линии) и с регулятором КО (сплошные линии)

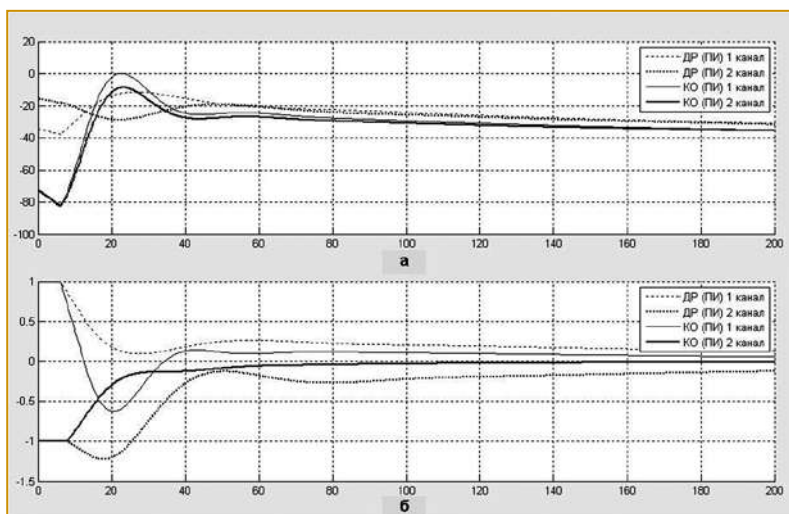


Рис. 7. Управляющие воздействия (а) и выходные переменные (б) в замкнутой системе с регулятором ДР (пунктирные линии) и с регулятором КО (сплошные линии)

Пунктирным линиям соответствуют процессы в замкнутой системе управления с децентрализованной структурой, где настройки двух ПИ-регуляторов найдены в результате минимизации ИКК поисковым путем без учета перекрестных связей (метод «автономный оптимальный» (АО)). Настройки ПИ-регулятора определяются матрицей:

$$A = \begin{bmatrix} 61,2 & 0 \\ 0 & -29,6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,69 & 0 \\ 0 & -0,56 \end{bmatrix}.$$

Сплошным линиям соответствует поведение централизованной системы с четырьмя ПИ-регуляторами, рассчитанными с применением поисковых процедур рассмотренного в статье комбинированного метода (метод «комбинированный оптимальный» (КО)). Настройки ПИ-регулятора определяются матрицей:

$$A = \begin{bmatrix} 39,6 & -33,5 \\ 31 & -41,5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,89 & -0,75 \\ 0,69 & -0,93 \end{bmatrix}.$$

Сравнение графиков показывает, что при отсутствии учета перекрестных связей переходные процессы характеризуются сильными колебаниями и медленной сходимостью. Учет перекрестных связей в рамках централизованной структуры позволяет снизить колебания и ускорить переходный процесс. Если для АО-регулятора показатель качества управления ИКК = 0,27, то для КО-регулятора ИКК = 0,14. Таким образом, рассмотренный в статье комбинированный метод позволил примерно в два раза уменьшить ИКК по сравнению с традиционным способом независимой настройки автономных регуляторов.

Для сравнения возможностей децентрализованного и централизованного управления по учету перекрестных связей в объекте управления представим на рис. 7 графики переходных процессов для децентрализованного двумерного ПИ-регулятора, рассчитанного согласно известному методу ДР [3], и для рассмотренного выше централизованного ПИ-регулятора, рассчитанного по методу КО. Настройки ДР-регулятора определяются диагональной матрицей:

$$A = \begin{bmatrix} 34,4 & 0 \\ 0 & -15,7 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,57 & 0 \\ 0 & -0,45 \end{bmatrix},$$

которая вследствие учета перекрестных связей отличается от матрицы АО-регулятора.

Из графиков видно, что хотя ДР-регулятор обеспечил ослабление колебаний в сравнении с АО-регулятором, однако не смог увеличить быстродействие системы управления. В итоге он более чем в два раза уступил по ИКК централизованному

КО-регулятору (для ДР-регулятора ИКК = 0,30, а для КО-регулятора ИКК = 0,14).

Для уменьшения колебательности переходных процессов, характерной для расчетов по ИКК, при использовании ПрК могут применяться такие приемы, как оптимизация по критерию ИККогр и учет ограничений на управляющие воздействия. Продемонстрируем это на том же примере.

Рассчитанный с применением ПрК аналитически (то есть по формулам без использования поисковых процедур) централизованный комбинированный ПИ-регулятор (в ПрК он называется «комбинированный (r по Бристолу)» [6, 8] или коротко КМБ-регулятор) задается матричными коэффициентами:

$$A = \begin{bmatrix} 42,4 & -5,4 \\ 5,0 & -23,2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,78 & -0,15 \\ 0,14 & -0,66 \end{bmatrix}.$$

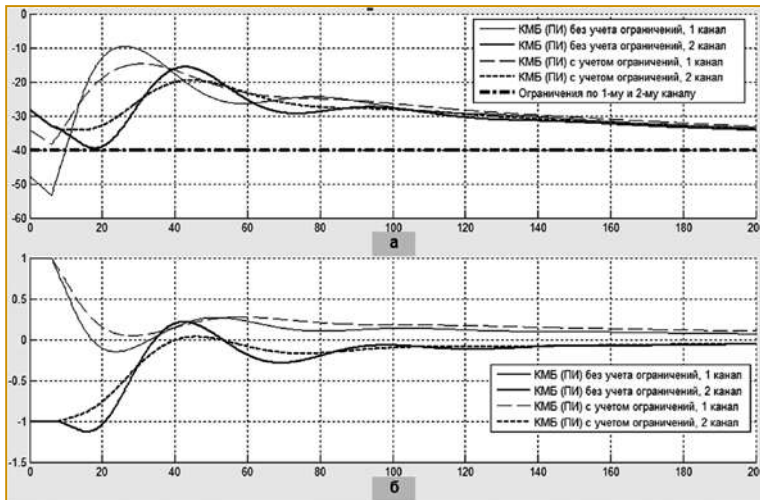


Рис. 8. Управляющие воздействия (а) и выходные переменные (б) в замкнутой системе с регулятором КМБ (ПИ), рассчитанным без учета (сплошные линии) и с учетом (пунктирные линии) ограничений на управление

Для снижения колебательности переходных процессов вводятся ограничения на управление  $|u_1(t)| \leq 40$ ,  $|u_2(t)| \leq 40$ . С учетом этих ограничений также аналитически рассчитывается КМБ ПИ-регулятор:

$$A = \begin{bmatrix} 28,7 & -5,4 \\ 5,0 & -23,2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,55 & -0,15 \\ 0,14 & -0,66 \end{bmatrix}.$$

Как видно из рис. 8, показанные сплошными линиями переходные процессы вследствие ослабления настроек регулятора имеют менее колебательный характер. При этом управляющие воздействия находятся в рамках заданных ограничений.

#### Заключение

Для эффективного функционирования современных ТП необходимо поддерживать на заданных уровнях ряд технологических показателей в условиях неконтролируемых возмущений. Задача нередко осложняется из-за того, что каждое управляющее воздействие оказывает влияние на несколько выходных переменных. В работе предложено решение задачи стабилизации многосвязных объектов управления произвольной размерности в рамках наиболее распространенной технической структуры, представляющей собой совокупность типовых ПИ- и ПИД-регуляторов. С использованием ранее разработанного комбинированного метода настройки многомерных типовых регуляторов на основе универсальной программной среды Matlab-Simulink создан программный комплекс MIMO-Master. Он дает возможность рассчитать пара-

метры регуляторов, учитывая ограничения на управляющие воздействия и ряд инженерных требований к переходным процессам. Найденные или предложенные пользователем настройки регуляторов могут быть всесторонне проверены предоставляемыми средствами имитационного моделирования. Удобный интерфейс не требует от пользователя ПрК непосредственного общения со средой программирования.

Ожидается, что ПрК MIMO-Master найдет широкое применение в области промышленной автоматизации. В течение нескольких последних лет ПрК используется в учебных целях на кафедре «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и на кафедре «Автоматизация процессов химической промышленности» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

#### Список литературы

1. Яковис Л.М. От единого информационного пространства к единому пространству управления производством // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1.
2. Гельфанд Я.Е., Маслов А.Е., Яковис Л.М. Оперативная оптимизация приготовления и помола цементной шихты // Цемент. 1986. №7.
3. PID Control for Multivariable Processes // Qing-Guo Wang [et al.] Springer-Verlag. 2008.
4. Яковис Л.М. Многоуровневое управление производством (состояние, проблемы, перспективы) // Автоматизация в промышленности. 2009. № 9.
5. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10.
6. Яковис Л.М. Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2007. №6.
7. Rivera, D. E., Morari, M., Skogestad, S. Internal model control. 4. PID controller design // Industrial & Engineering Chemistry, Process Design and Development. 1986. 25(1).
8. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2009. №6.
9. Sporyagin K., Yakovis L. Software Package MIMO Master for Approximate Optimization of Multivariable Control Systems with Time Delay // Университетский научный журнал (Humanities & Science University Journal). 2015. № 15.
10. Яковис Л.М. Многокомпонентные смеси для строительства. Расчетные методы оптимизации состава. Л. Стройиздат. 1987.

*Яковис Леонид Моисеевич – д-р техн. наук, проф. Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,*

*Спорягин Кирилл Владимирович – канд. техн. наук, ст. преподаватель Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).*

*Контактный телефон (812) 759-71-21.*

*E-mail: leonid@yakovis.com ksporyagin@mail.ru*