



АЛГОРИТМЫ СУПЕРВИЗОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В.П. Мешалкин (РХТУим. Д.И. Менделеева),

А.Е. Мерцалов (ООО "Р.В.С"), А.А. Говоров, У.М. Сусак (ТулГУ)

Исследуется проблема повышения качества автоматических систем регулирования, позволяющих одновременно оптимальным образом обрабатывать задающие и возмущающие воздействия на непрерывные технологические объекты. Предлагаются супервизорные ПИ-, ПИД-регуляторы, у которых в каналах задания для каждой составляющей закона управления установлены дополнительные динамические блоки.

Ключевые слова: регулятор, супервизорный регулятор, супервизорная система регулирования, качество регулирования, объект управления.

Типовые ПИ-, ПИД-регуляторы не позволяют одновременно оптимальным образом обрабатывать задающие воздействия и компенсировать возмущения непрерывных технологических объектов управления (ТОУ). Для этого у регулятора должны быть различные динамические характеристики по каналам задания и регулируемого параметра. Такая проблема возникает в автоматических системах регулирования (АСР) в супервизорном режиме управления, а также в каскадных АСР, в АСР соотношения технологических параметров (следящие АСР) и в обычных АСР (в системах стабилизации) при частых изменениях задающего воздействия [1–4].

Относительно просто эту задачу можно решить путем установки в каналах задания для каждой составляющей закона управления дополнительных динамических блоков K_1 , K_2 , K_3 с оптимальными параметрами при обработке задания (рис. 1). При этом параметры настройки исходного алгоритма (закона) управления выбираются с учетом оптимальной компенсации возмущающего воздействия в АСР [5].

Схема предложенного супервизорного регулятора, представленная на рис. 1, является более общей для типового ПИД-закона управления, чем известные [3, 4]. Особенностью схемы является обработка сигнала задания по трем составляющим ПИД-закона

с дополнительными статическими и динамическими звеньями K_1 , K_2 и K_3 . Эта структура имеет несколько вариантов (в том числе известных) и наилучший может подбираться моделированием и (или) оптимизацией для выбранного объекта управления и внешних воздействий [5].

В схеме регулятора (рис. 1) для вычисления ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ установлен дополнительный элемент сравнения. Этот сигнал используется для индикации, а также для вычисления показателей качества регулирования, например, при моделировании.

При $K_1 = K_2 = K_3 = 1$ получим структурную схему знакомого всем типового “учебного” ПИД-регулятора, а при $K_1 = K_2 = 1$, но $K_3 = 0$ — схему известного промышленного супервизорного ПИД-регулятора с воздействием по производной только от регулируемого параметра Y (например, ПИД-регулятор типа ПР3.35 пневматической системы СТАРТ, а также регулятор [2, с. 207, рис. 8.5, б]). Если же $K_1 = K_3 = 0$ и только $K_2 = 1$, получаем также известный супервизорный ПИД-регулятор с подачей сигнала задания $Y_{зд}$ только на интегратор [2, с. 207, рис. 8.5, в]. При $K_1 \neq 1$ (как правило, $K_1 < 1$) и по-прежнему $K_2 = K_3 = 1$ получается структурная схема супервизорного регулятора, предложенного А. И. Бирманом [1]. В работе [3] предложен ПИД-регулятор с весовыми коэффициентами $K_1 \neq 1$ и $K_3 \neq 1$ при пропорциональной и дифференциальной составляющими, а для интегральной составляющей весовой коэффициент отсутствует ($K_2 = 1$) для обеспечения нулевой ошибки в установившемся режиме. При этом весовой коэффициент K_3 часто выбирают, равным нулю, чтобы не дифференцировать резкие выбросы задающего воздействия [4].

Рассмотрим схемотехнические принципы и способы построения супервизорных автоматических систем и регуляторов. Эти способы не зависят от технических методов реализации и осу-

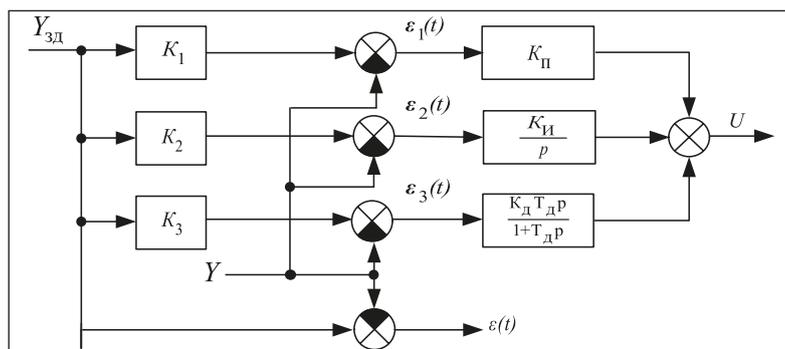


Рис. 1. Структурная схема супервизорного ПИД-регулятора

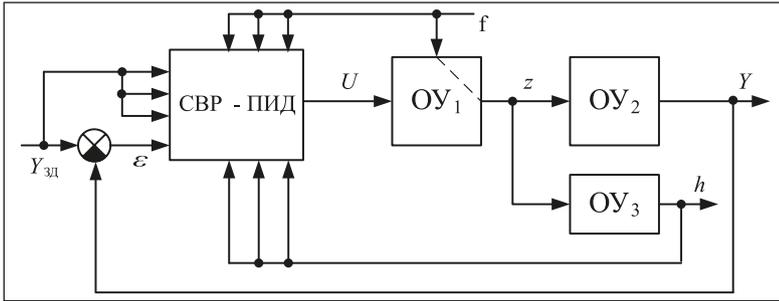


Рис. 2. Схема многофункциональной супервизорной АСР

ществляются определенным воздействием на сигналы пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей регулятора.

В общем случае необходимо корректировать все составляющие закона управления по трем каналам (рис. 2): по заданию $Y_{зд}$, по измеряемому возмущающему воздействию f (при наличии датчика) и по каналу дополнительной информации h о регулируемом параметре (также при наличии датчика). Выход h быстрее реагирует на возмущения f , чем основная регулируемая величина Y . Использование этой дополнительной информации позволит значительно повысить качество регулирования параметра Y на выходе ТОО. Выходные сигналы трех каналов: заданного значения $Y_{зд}$ регулируемого параметра Y , измеряемо-

го возмущения f и дополнительной информации h — осуществляют коррекцию всех составляющих закона управления супервизорного ПИД-регулятора через соответствующие динамические звенья.

На рис. 3 показана схема супервизорного ПИД-регулятора с коррекцией по двум каналам: заданного значения $Y_{зд}$ регулируемого параметра и измеряемого возмущения f . Отличием предлагаемого супервизорного регулятора от обычных ПИД-регуляторов является наличие дополнительных динамических звеньев K_1 — K_6 в каналах подачи сигналов коррекции по измеряемым возмущениям для всех составляющих закона управления.

В качестве примера АСР с измеряемым возмущением можно привести системы отопления, где регулируемым параметром является температура воды на входе в систему отопления или температура воздуха в отапливаемом помещении, а канал измеряемого возмущения подключается к датчику температуры наружного воздуха. При автоматизации конкретного ТОО регулятор может использоваться в одно-, двух- и трехканальном исполнении супервизорной части. Если необходимо подать сигнал коррекции по каналу дополнительной информации h , то это осуществляется по аналогии с заданием $Y_{зд}$ или возмущением f через дополнительные динамические звенья K_7 — K_9 на выходе канала информации h .

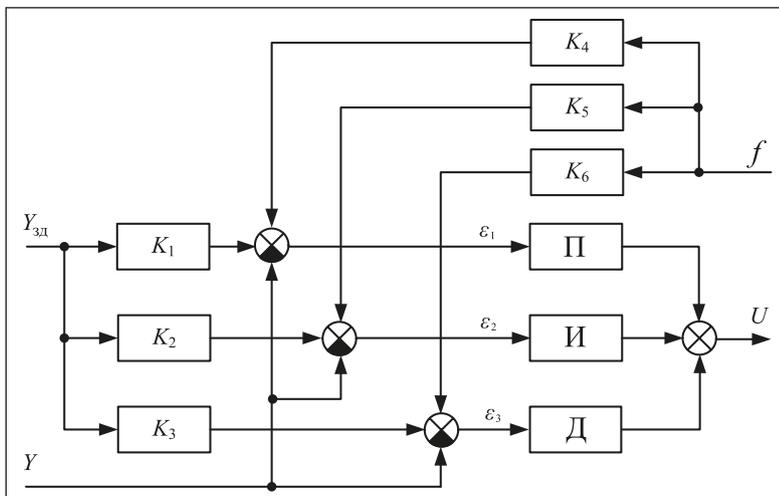


Рис. 3. Схема двухканального супервизорного ПИД-регулятора

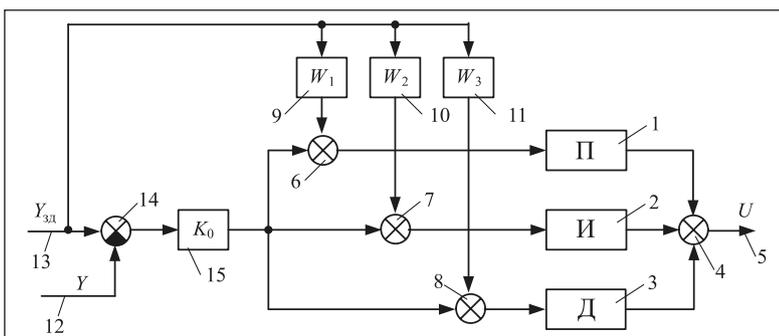


Рис. 4. Схема изодромного супервизорного ПИД-регулятора

Предложены методы построения супервизорных регуляторов, основанные на применении в супервизорных частях различных звеньев: масштабирующих, интегро-дифференцирующих, дифференцирующих и их комбинаций — супервизорные регуляторы смешанного типа.

Однако эти супервизорные ПИД-регуляторы не обеспечивают отдельной настройки общего коэффициента передачи регулятора, а значит, и коэффициента передачи всей системы регулирования, что снижает удобство настройки и применения регуляторов. При необходимости изменения коэффициента передачи всей системы регулирования приходится одновременно изменять все три параметра настройки пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих закона регулирования. На рис. 4 представлена структурная схема изодромного супервизорного ПИД-регулятора с общим коэффициентом передачи K_0 для всех трех составляющих закона регулирования: П, И, Д.

Изодромный супервизорный ПИД-регулятор решает задачу повышения ка-

чества регулирования технологических параметров за счет реализации супервизорного режима и расширения функциональных возможностей при настройке регулятора. Регулятор способен обработать (одновременно) с высоким качеством и задающее, и возмущающее воздействия, а также повышает удобство настройки систем регулирования:

- возможна независимая настройка каждой составляющей закона регулирования (пропорциональной, интегральной и дифференциальной);

- а также отдельная настройка общего коэффициента передачи K_0 регулятора, а значит, и коэффициента передачи всей системы регулирования.

Супервизорный изодромный ПИД-регулятор (рис. 4) содержит параллельно соединенные усилитель 1, интегратор 2, дифференциатор 3, выходы которых соединены со входами сумматора 4. Выход последнего подключен к выходному каналу регулятора 5, а входы усилителя 1, интегратора 2, дифференциатора 3 подключены к выходам соответственно первого 6, второго 7 и третьего 8 элементов сравнения. Первые плюсовые входы последних соединены с выходами соответственно первого 9, второго 10 и третьего 11 динамических звеньев, входы которых подключены к выходу канала задания 13. Вторые плюсовые входы первого 6, второго 7 и третьего 8 элементов сравнения подключены к выходу масштабирующего усилителя 15, вход которого соединен с выходом четвертого элемента сравнения 14, плюсовой и минусовой входы которого подключены соответственно к каналу задания 13 и каналу регулируемого параметра 12.

Супервизорный изодромный ПИД-регулятор (рис. 4) работает следующим образом. При подавлении возмущающего воздействия в автоматической системе регулирования задание $Y_{здн}$ постоянно, и следовательно, выходные сигналы динамических звеньев 9–11 тоже являются постоянными и не влияют на выходной сигнал U регулятора. При этом изменение выходного сигнала U (чтобы скомпенсировать возмущающее воздействие) зависит только от регулируемого параметра (сигнал Y) и блоков 1–3 с оптимальными настройками (оптимальными для компенсации только возмущающего воздействия в АСР).

При обработке задающего воздействия $Y_{здн}$ на плюсовой вход каждого элемента сравнения 6–8 поступает скорректированный сигнал задания с выхода соответствующего динамического звена 9, 10 или 11. Параметры корректирующих динамических звеньев 9–11 подбираются таким образом, чтобы исходный (блоки 1–3) ПИД-регулятор (с неоптимальными настройками для обработки задающего воздействия, но с оптимальными — для подавления возмущающего воздействия) качественно обработал и задающее воздействие.

Супервизорный изодромный ПИД-регулятор обеспечивает настройку общего коэффициента передачи K_0 масштабирующего усилителя 15, а значит, и коэффициента передачи всей системы регулирования, что

повышает удобство настройки и применения регуляторов. В известных супервизорных ПИД-регуляторах при необходимости изменения коэффициента передачи всей системы регулирования приходилось одновременно изменять все три параметра настройки П-, И- и Д- составляющих закона регулирования. В то же время при необходимости независимой настройки параметров каждой составляющей закона регулирования (пропорциональной K_p , интегральной $T_{из}$ и дифференциальной $T_{пв}$) достаточно соответственно изменить параметры звеньев 1, 2 или 3.

По сравнению с известными, супервизорный изодромный регулятор позволяет обеспечить существенное улучшение динамических характеристик систем регулирования технологических параметров при отработке возмущений по различным каналам, а также расширить функциональные возможности АСР при их настройке. Регулятор имеет простую настройку общего коэффициента передачи и, следовательно, коэффициента передачи всей системы регулирования, что повышает удобство настройки и расширяет область применения этих регуляторов. Супервизорный изодромный ПИД-регулятор можно выполнить на элементах цифровой и микропроцессорной техники и даже на элементах и модулях промышленной пневмоавтоматики его реализация не вызывает затруднений.

Термин «изодромный» кратко характеризует структуру регуляторов с общим коэффициентом передачи для различных составляющих закона регулирования, с настройками, зависящими от этого коэффициента. в отличие от регуляторов с независимыми настройками всех составляющих закона регулирования.

Это актуально для всех структур регуляторов и способов их реализации: аналоговых и цифровых, пневматических и электрических, электронных, микроэлектронных и микропроцессорных. Отметим, что есть регуляторы со смешанными настройками, например, ПИ-часть с независимыми настройками, а Д-часть с настройкой, зависящей от общего коэффициента передачи П-части — таким был пневматический ПИД-регулятор ПР3.35 завода «Тизприбор» (Москва).

Основным методом решения задачи анализа и синтеза супервизорных АСР для объекта с запаздыванием является имитационное моделирование на вычислительных машинах. Для поиска оптимальных параметров супервизорных регуляторов рекомендуется последовательный симплексный метод с автоматическим выбором шага, позволяющий достаточно точно определить положение экстремума. В качестве критерия параметрической оптимизации выбирается один из показателей качества.

Для исследования влияния изменений параметров супервизорных регуляторов на характеристики процессов управления разработаны методика и алгоритмы математического моделирования, которые позволяют оценивать влияние изменений параметров

ОУ на показатели качества системы и определить степень грубости систем с различными типами регуляторов по интегральным функциям чувствительности в виде статических зависимостей выбранного показателя качества регулирования от относительного изменения параметров объекта. Предложена методика моделирования на микропроцессорном контроллере Ремиконт Р-130 супервизорных регуляторов и методика исследования супервизорных АСР с использованием достаточно мощной по своим возможностям программы компьютерной математики VisSim.

Исследование супервизорных ПИ-регуляторов

В данной работе проведены исследования автоматической системы АСР с ПИ-регулятором, которая является оптимальной при обработке возмущающего воздействия, но не оптимальной при обработке скачкообразного сигнала задания. Для установления этого простого факта достаточно определить оптимальные настройки ПИ-регулятора для компенсации: 1 — возмущения по заданию; 2 — возмущения по нагрузке.

Оптимизация параметров регулятора проведена по квадратичному критерию $J_2 = \int x^2 dt \Rightarrow \min$. Параметры модели объекта управления ТОУ 1-го порядка с запаздыванием: $\tau = 0,25$; $k_0 = 1$; $T_0 = 1$. Результаты оптимизации приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оптимизации АСР с типовым ПИ-регулятором

	-		
	K	K	
	$K_1 = 3,375778$	$K_1 = 2,15398$	1
	$K_2 = 4,91982$	$K_2 = 5,87687$	2

Предлагаемая общая схема супервизорного управления с ПИ-регулятором также имеет множество вариантов реализации. В данной работе предполагается провести исследование следующих систем: 1) АСР1 с обычным ПИ-регулятором с оптимальными настройками для компенсации возмущения по заданию; 2) АСР2 с обычным ПИ-регулятором с оптимальными настройками для компенсации возмущения по нагрузке; 3) АСР3 с супервизорным ПИ-регулятором с оптимальными настройками для компенсации возмущения по нагрузке и с оптимальной настройкой $K_{1\text{ опт}} = 0,540608$ супервизорной части в канале задания П-части; 4) АСР4 более общего вида с таким же ПИ-регулятором и с оптимальными настройками сложной супервизорной части.

Отличие известной супервизорной АСР3 от АСР2 с обычным ПИ-регулятором заключается только в наличии у АСР3 дополнительного пропорционального звена K_1 в канале обработки задания для П-части. Разность сигналов на выходе звена K_1 и в обратной связи АСР3 подается на пропорциональную составляющую ПИ-регулятора.

Супервизорная часть регулятора (звенья K_1 и K_2) в общем случае может быть представлена динамическими звеньями (АСР4) с передаточными функциями:

$$W_1 = (K_1(1 + T_{1p})) / (1 + T_{2p}), W_2 = (K_2(1 + T_{3p})) / (1 + T_{4p})$$

с оптимальными значениями параметров их настройки: $K_{1\text{ опт}} = 0.20513$, $T_{1\text{ опт}} = 0.58609$, $T_{2\text{ опт}} = 0.0147$; $K_{2\text{ опт}} = 1$, $T_{3\text{ опт}} = 0.9992$, $T_{4\text{ опт}} = 0.39066$ для заданного объекта ТОУ при обработке задания.

Для исследования АСР в соответствующем редакторе создается структура моделируемой системы, в которой устанавливаются необходимые значения параметров объекта управления и настроек ПИ-регулятора. Задаются приближенные границы изменения оптимизируемых параметров системы. Запускается режим оптимизации, по окончании которого определяются вычисленные оптимальные параметры настройки супервизорных частей регулятора в канале задания. При моделировании оптимальных АСР фиксируется значение интегрального квадратичного критерия качества J_2 , значение интегрального абсолютного критерия качества J_1 , времени переходного процесса t_p и величины перерегулирования [6].

Следует отметить, что выбор критерия для оптимальной настройки регулятора во многом является произвольным и зависит от предпочтений проектировщика. А критерий является лишь инструментом для работы программы оптимизации. Причем оптимизация по интегральному квадратичному критерию J_2 приводит к весьма колебательным процессам, особенно для объектов без самовывравнивания. Для таких объектов удобнее использовать интегральный абсолютный критерий J_1 — интеграл от модуля ошибки регулирования. Время регулирования t_p трудно использовать в качестве критерия оптимальности из-за

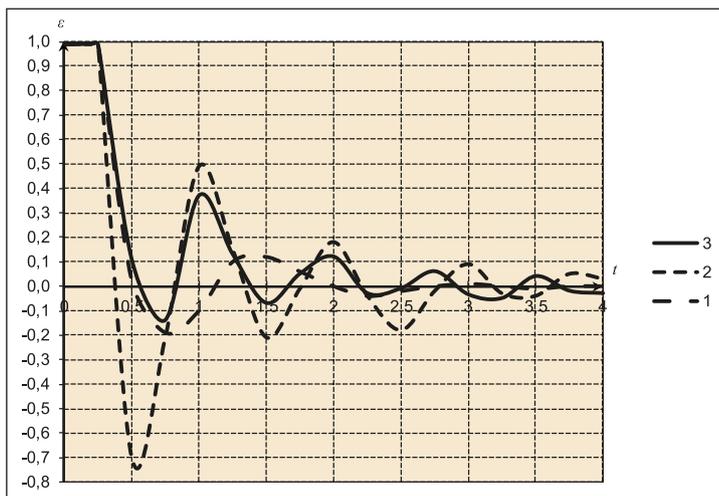


Рис. 5. Графики переходных процессов при обработке задания в различных АСР с ПИ-регуляторами с оптимальными настройками для компенсации: 1 – возмущения по заданию (АСР1); 2 – возмущения по нагрузке (АСР2); 3 – возмущения по нагрузке и с оптимальной настройкой K_1 супервизорной части в канале задания (АСР3)

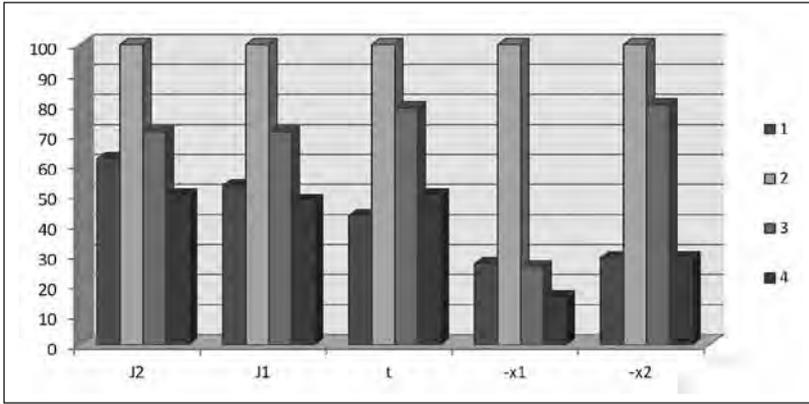


Рис. 6. Показатели качества отработки скачка по заданию в различных АСР с ПИ-регуляторами с оптимальными настройками по критерию J_2 : 1 – исходная АСР1; 2 – АСР2 для отработки возмущения по нагрузке; 3 – простейшая супервизорная АСР3; 4 – супервизорная АСР4 общего вида при $W_{1опт}$ $W_{2опт}$

Таблица 2. Показатели качества простейшей супервизорной АСР3 при различных значениях параметра настройки масштабирующего усилителя K_1 в канале задания пропорциональной части ПИ-регулятора

K_1	3		K_1	3	
	J_2	J_1		J_2	J_1
-1	2,265	1,910	0,5	0,428	0,738
-0,5	1,266	1,440	0,540 (K_1 J_2)	0,427	0,752
-0,2	0,852	1,176	0,6	0,430	0,778
0	0,653	1,006	0,8	0,480	0,903
0,3	0,472	0,776	1	0,590	1,060
0,4	0,442	0,729	1,5	1,140	1,516
0,425 (K_1 J_1)	0,437	0,727	2	2,080	2,010

его разрывного характера. Обобщенный интегральный квадратичный критерий неудобен вследствие проблемы выбора его коэффициентов.

Обработка результатов исследования

Графики переходных процессов в различных АСР при подаче скачка задающего воздействия, приведенные на рис. 5, показывают, что АСР2, оптимальным образом компенсирующая возмущающее воздействие, не обеспечивает приемлемого качества регулирования при отработке задания. В частности, первый (x_{max1}) и второй (x_{max2}) выбросы ошибки регулирования ϵ в АСР2 почти в 4 раза больше, чем у исходной АСР1, предназначенной для оптимальной отработки задающего воздействия, но плохо отработывающей возмущения по нагрузке.

Простейший супервизорный регулятор (АСР3) существенно повышает качество переходного процесса по сравнению с АСР2, но по большинству показателей качества (исключая незначительное уменьшение первого выброса x_{max1}) все же хуже исходной оптимальной (для сравнения) АСР1 (рис. 6). Более сложный супервизорный регулятор (АСР4) обеспе-

чивает наилучшие показатели качества отработки задания, кроме незначительного ($\approx 3\%$) увеличения второго выброса x_{max2} . При этом система АСР4 оптимальным образом (как и АСР2 и АСР3) компенсирует и возмущающее воздействие.

Все сравниваемые системы: АСР2, АСР3 и АСР4 отработывают внешние возмущения одинаково, так как у них одинаковые параметры настройки ПИ-части. Система АСР1 с обычным ПИ-регулятором с оптимальными настройками для компенсации возмущения по заданию используется как контрольная.

Рис. 5 и рис. 6 показывают, что предлагаемые супервизорные регуляторы позволяют существенно повысить качество переходных процессов по сравнению с обычными регуляторами.

Интересные выводы позволяет сделать рассмотрение зависимости показателей качества простейшей супервизорной системы АСР3 от параметра настройки масштабирующего усилителя K_1 в канале задания для пропорциональной составляющей ПИ-регулятора (табл. 2).

В частности, оптимальные значения коэффициента K_1 по различным критериям (здесь интегральные показатели качества J_1 и J_2) практически совпадают ($\Delta K_1 \approx 20\%$). При отсутствии усилителя ($K_1=0$) АСР3 по критерию J_1 является

более качественной, чем обычная система АСР2, которая представляет собой частный случай простой супервизорной АСР3 при $K_1=1$. То есть на пропорциональную часть ПИ-регулятора сигнал задания можно

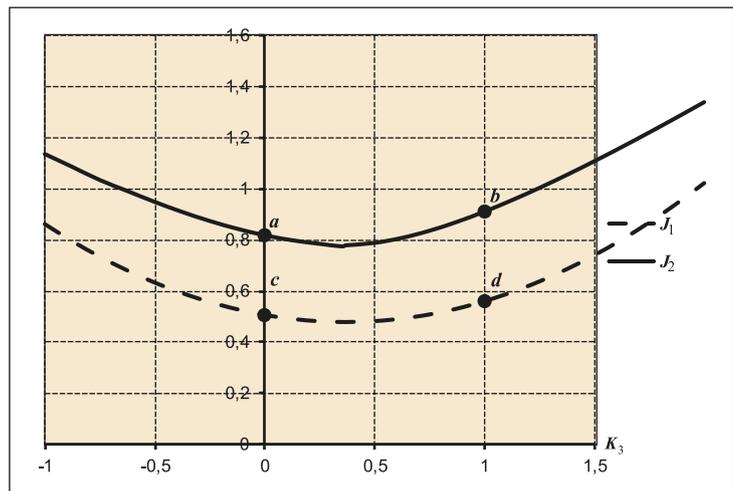


Рис. 7. Зависимость показателей качества простейшей супервизорной системы АСР3 от параметра настройки масштабирующего усилителя K_3 в канале задания дифференцирующей части ПИД-регулятора (при $K_1 = K_2 = 1$): $K_{3опт,J1} = 0,352$; $K_{3опт,J2} = 0,369$

не подавать, при этом большинство качественных показателей АСР будет лучше (за исключением значения $\Delta J_2 \cong 11\%$) и дополнительно упрощается конструкция регулятора.

На интегральную часть регулятора сигнал задания необходимо подавать полностью, что подтверждается и результатами оптимизации параметров звена W_2 ($K_{2\text{опт}} = 1$) в канале задания И-части в супервизорной АСР4 общего вида. Точнее на И-часть регулятора задание необходимо подавать без какого-либо масштабирования в статическом режиме. В противном случае появится статическая ошибка регулирования.

Исследование супервизорных ПИД-регуляторов

Аналогичные выводы (как у супервизорных ПИ-регуляторов) позволяет сделать анализ зависимости показателей качества простейшей супервизорной АСР3 от параметра настройки масштабирующего усилителя K_3 в канале задания для дифференциальной составляющей ПИД-регулятора (рис. 7).

В частности, оптимальные значения коэффициента масштабирования K_3 в канале задания для Д-составляющей по различным критериям (здесь интегральные показатели качества J_1 и J_2) практически совпадают ($\Delta K_3 \cong 5\%$). При отсутствии усилителя ($K_3 = 0$) АСР3 по всем рассмотренным критериям является более качественной, чем обычная АСР1. То есть на дифференциальную и пропорциональную части ПИД-регулятора сигнал задания лучше не подавать, при этом качество АСР будет лучше и дополнительно упрощается конструкция регулятора.

Получены номограммы настройки супервизорной части K_1 , K_3 в канале задания ПИД-регулятора для объекта с самовыравниванием 1-го порядка при различных относительных значениях запаздывания в пределах: $\tau/T_0 = 0,1 \dots 1$. Оптимизация параметров регулятора (K_1 , K_2 , K_3) проведена по квадратичному критерию $J_2 = \int e^2 dt \Rightarrow \min$. Заметим, что при этом регулирующая часть ПИД регулятора (КП, КИ, КД) должна быть оптимально настроена для обработки только возмущающего воздействия. В результате данная АСР является оптимальной при обработке возмущающего воздействия, но не оптимальной при обработке скачкообразного сигнала задания, если отсутствует супервизорная часть с оптимально настроенными параметрами K_1 , K_2 , K_3 .

Аналогично (как у супервизорных ПИ-регуляторов), для каждого объекта управления на интегральную часть ПИД-регулятора сигнал задания необходимо подавать полностью, что подтверждается и результатами оптимизации параметров звена W_2 в канале задания

И-части в супервизорной АСР4 общего вида. Точнее, на интегральную часть ПИД-регулятора задание необходимо подавать без какого-либо масштабирования в статическом режиме. В противном случае появится статическая ошибка регулирования, поэтому для всех случаев $K_{2\text{опт}} = 1$.

Таким образом, главным отличием по структуре супервизорных регуляторов от обычных ПИ- и ПИД-регуляторов является наличие в каналах задания для отдельных (или всех) составляющих закона управления дополнительных блоков с различными передаточными функциями. Термин «супервизорный» подчеркивает назначение супервизорных регуляторов — для работы в супервизорном режиме, когда задание регулятору поступает с верхнего уровня управления и изменяется с течением времени. Задача супервизорного регулятора при этом оптимально и непрерывно обрабатывать как возмущения, так и задающее воздействие.

Вопросы разработки и исследования алгоритмов супервизорного управления весьма актуальны, поскольку применение алгоритмов такого типа позволяет существенно улучшить качество АСР при обработке возмущений по различным каналам и соответственно расширить функциональные возможности АСР. Применение подобных алгоритмов по сравнению с широко распространенными в настоящее время лишь немногим дороже, так как их реализация современными микропроцессорными средствами весьма проста [5].

Список литературы

1. Бирман А.И. Пневматический супервизорный регулятор// Тезисы докладов всесоюз. совещания «Пнеumoгидроавтоматика и пневмопривод». Суздаль, апрель 1990. Ч.1. М.: 1990. С. 88.
2. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480 с.
3. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. 460 p.
4. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации// Современные технологии автоматизации, 2006, № 4, с. 66-74; 2007, № 1, с. 78-88.
5. Говоров А.А., Сухинин Б.В., Баженов А.В. и др. Микропроцессорные контроллеры автоматических систем регулирования с расширенными функциональными возможностями. Тула: ТулГУ, 2003. 172 с.
6. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Говоров А.А. и др. Алгоритмы анализа и оптимизации автоматических систем регулирования с расширенными функциональными возможностями для химико-технологических процессов// Теоретич. основы химич. технологии. Т. 26. 1992. № 4. с. 562 - 569.

Мешалкин Валерий Павлович — член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева,
Мерцалов Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, технический директор Тульского инженерного центра ООО "Р.В.С",
Говоров Андрей Александрович — канд. техн. наук, ассистент,
Сусак Уляна Мирославовна — аспирант Тульского государственного университета.
 Контактный телефон 8 (495) 797-96-92.
 E-mail: mail@rvsco.ru