

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

**С.В. Шидловский**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

Учебное пособие



Томск – 2005

УДК 62.50

Ш 564

Ш 564        **Шидловский С.В.** Автоматизация технологических процессов и производств: Учебное пособие. –Томск: Изд-во НТЛ, 2005. –100 с.

ISBN

Пособие содержит основные сведения по выполнению разделов курсовой работы и включает современные требования к разработке систем автоматического регулирования, методики и пример их расчета, необходимую справочную информацию.

Пособие подготовлено на кафедре информационно-измерительной техники ТУСУРа и предназначено для студентов специальности 220301.

**УДК 62.50**

Рецензент: **В.С. Андык**, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Томского политехнического университета

ISBN

© С.В. Шидловский, 2005

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1. Классификация промышленных объектов управления</b> .....	7
<b>2. Идентификация объекта управления</b> .....	11
<b>3. Автоматические системы регулирования с переменной структурой</b> .....	19
3.1. Математическое описание систем автоматического управления технологическими процессами и понятие фазового пространства .....	19
3.2. Понятие систем с переменной структурой .....	23
3.3. Метод фазового пространства .....	26
3.4. Типы движения в системах с переменной структурой .....	30
<b>4. Синтез устройств управления</b> .....	35
4.1. Управление объектами без запаздывания .....	35
4.2. Управление объектами, имеющими величину запаздывания .....	37
4.3. Интегральный регулятор с переменной структурой .....	39
4.4. Интегральный дискретный регулятор с переменной структурой .....	42
<b>5. Имитационное моделирование динамических систем</b> .....	46
5.1. Задание модели .....	46
5.2. Свойства lti-объектов .....	51
5.3. Анализ моделей lti-объектов .....	54
5.4. Использование пакета Simulink .....	56
5.5. Использование S-функций .....	60
<b>6. Пример расчета</b> .....	76
<b>7. Вопросы для самоконтроля</b> .....	94
<b>Список литературы</b> .....	95
<b>Приложение. Задание</b> .....	97

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производства – этап машинного производства, характеризуемый освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам. При автоматизации производства процессы получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов и информации выполняются автоматически.

Технический процесс характеризуется непрерывным расширением автоматизации производства – от частичной автоматизации, то есть автоматического выполнения отдельных производственных операций, к полной автоматизации со все большим переходом к цехам- и заводам-автоматам, обеспечивающим наивысшую технико-экономическую эффективность. Важнейшим критерием целесообразности проводимой автоматизации того или иного процесса является экономическая эффективность, поэтому осуществлению автоматизации в той или иной форме обязательно должно предшествовать экономическое исследование.

Частичная автоматизация является отличительной особенностью всякого машинного производства. В рамках конкретного технологического процесса управление сводится к реализации воздействий средств труда на предмет труда в заданной последовательности. Знание этой последовательности и есть знание закона управления данным процессом. Для несложных процессов, которые происходят всегда при одних и тех же условиях, закон управления может быть представлен в виде совершенно определенной и неизменной программы движений орудий труда относительно обрабатываемого материала – предмета труда.

Комплексная автоматизация – системный охват автоматизации производственных и экономико-административных процессов в рамках агрегата, отдельного технологического процесса, цеха, предприятия и более высоких производственных и хозяйственных формаций. Комплексная автоматизация базируется на достигнутом уровне развития кибернетики и, в

частности, ее разделов – технической кибернетики и экономической кибернетики.

Технологические процессы представляют собой первичное звено создания материальных ценностей, они обеспечивают производство необходимой для существования общества продукции.

Понятие «технологический процесс» в дальнейшем будет использовано в широком смысле и будет включать как непосредственные процессы производства определенного продукта, так и процессы обеспечения нормального функционирования. Такое представление дает возможность с единой точки зрения подойти как к решению задачи управления процессом производства определенного продукта в целом, так и задач управления отдельными технологическими агрегатами.

Автоматизация играет ключевую роль в нашем обществе. Различные автоматические устройства позволяют увеличить выпуск продукции в расчете на одного работающего, чтобы сбалансировать инфляционные издержки и рост заработной платы. Поэтому в промышленности используется термин производительность (в первую очередь – производительность труда), которая определяется как отношение выпуска продукции к реальным затратам в расчете на один час рабочего времени. Кроме того, промышленные предприятия стремятся постоянно улучшать потребительские качества выпускаемой продукции. Таким образом, автоматизация позволяет увеличить производительность и повысить качество выпускаемой продукции.

Технологический процесс, происходящий в регулируемом объекте, в общем случае характеризуется несколькими регулируемыми величинами. Задача регулирования промышленным агрегатом (объектом) сводится обычно к поддержанию заданных значений регулируемых величин, которые определяют качество технологического процесса и соответствие между производительностью и нагрузкой агрегата. Для поддержания заданных значений регулируемых величин необходимо воздействовать на соответствующие регулирующие органы.

Промышленные установки представляют собой, как правило, сложные регулируемые объекты с несколькими регулируемыми величинами. Сложный регулируемый объект обычно можно расчленить на несколько простых объектов (регулируемых участков). Поэтому в дальнейшем под термином «регулируемый объект» мы будем понимать простой, элементарный объект,

характеризуемый одной регулируемой величиной и имеющий один регулирующий орган.

Регулируемую величину часто называют выходной величиной объекта, а место ее проявления «выходом» объекта. На регулируемую (выходную) величину влияет не только регулирующее воздействие, идущее от регулирующего органа, но и возмущающее воздействие. Возмущающие и регулирующие воздействия называют входными величинами объекта, а места их приложения – «входами» объекта.

«Входы» считаются различными, если возмущающее воздействие одной и той же формы (например, скачкообразное), приложенное к этим «входам», дает различные формы переходного процесса. Несколько «выходов» могут геометрически находиться в одной и той же точке (например, давление и температура рабочего тела на выходе линейного участка в трубопроводном транспорте).

Динамические свойства регулируемых объектов, так же как и других элементов систем регулирования, могут быть представлены в различных формах.

Настоящее учебное пособие предназначено для выполнения студентами курсовых работ по дисциплине «Автоматизация технологических процессов и производств».

Цель пособия – объединить необходимые сведения о принципах работы промышленных автоматических систем регулирования, основных методах идентификации объектов управления и синтезе устройств управления в одном издании для выполнения курсовых работ по дисциплине «Автоматизация технологических процессов и производств».

Приведены необходимые справочные материалы, требования к пояснительной записке.

Учебное пособие может быть полезным студентам не только специальности 220301, но и других, изучающих основы современной теории управления.

Выполнение курсовых работ предполагает широкое применение средств вычислительной техники.

Пособие может быть использовано в процессе дипломного проектирования студентами специальности 220301 и родственной ей при разработке вопросов автоматизации технологических процессов.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Объекты управления по характеру протекания технологических процессов можно разделить на циклические, непрерывно-циклические и непрерывные.

По характеру установившегося значения выходной величины объекта при действии на его вход ступенчатого сигнала выделяют объекты с самовыравниванием и без самовыравнивания.

Объекты можно разделить в зависимости от количества входных и выходных величин и их взаимосвязи на одномерные (один вход и один выход) и многомерные. Последние могут быть многосвязными, – когда наблюдается взаимное влияние каналов регулирования друг на друга, либо несвязными – взаимосвязь между их каналами мала.

Одной из важных характеристик объекта управления являются статические характеристики, устанавливающие связь между установившимися значениями входа и выхода объекта. По виду статических характеристик объекты делятся на линейные и нелинейные. В последних статическая характеристика может быть гладкой, линеаризуемой в окрестности заданной точки либо носить существенно нелинейный характер. При наличии в объекте нескольких нелинейностей графическим методом определяется его суммарная нелинейная характеристика. Большинство систем регулирования относится к классу систем автоматической стабилизации режима работы объекта относительно его рабочей точки (относительно номинального режима работы). В этом случае в процессе работы отклонения переменных относительно рабочей точки будут малы, что позволяет использовать линейные модели объекта управления. Однако при смене рабочей точки происходит изменение коэффициента усиления объекта, что будет негативно влиять на динамику замкнутой системы.

Для системы автоматической стабилизации не обязательно определение полной статической характеристики объекта. Достаточно знать лишь динамический коэффициент усиления в окрестности рабочей точки. В то же время на некоторых объектах управления необходимо знание всей статической характеристики процесса. Если она носит нелинейный характер,

то с целью стабилизации общего коэффициента усиления системы в замкнутый контур включают дополнительную нелинейность, обратную статической характеристике объекта. На практике такой подход реализуется путем использования регулирующих клапанов с различными видами расходной характеристики.

Реальные объекты занимают в пространстве какой-либо объем, поэтому регулируемая величина зависит не только от времени, но и от текущих координат точки измерения. Поэтому полное описание объекта управления будет состоять из системы дифференциальных уравнений с частными производными. При использовании точечного метода измерения одним датчиком система дифференциальных уравнений с частными производными переходит в систему уравнений с обычными производными. Это существенно упрощает построение математической модели объекта, позволяя определить его передаточную функцию. Однако при наличии множества датчиков, распределенных, например, по длине объекта, может возникнуть необходимость использования множества управляющих сигналов (распределенное управление).

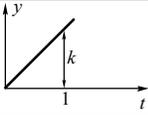
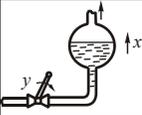
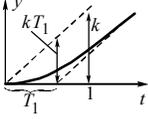
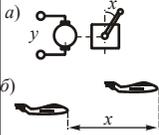
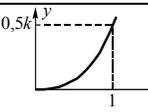
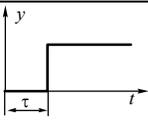
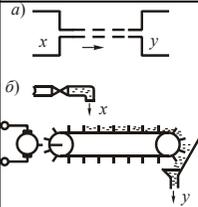
Объекты могут быть как стационарные, так и нестационарные. В нестационарных объектах параметры изменяются с течением времени (дрейфуют). Примерами таких объектов могут быть химический реактор с катализатором, активность которого падает с течением времени, или аэрокосмический аппарат, масса которого по мере выгорания топлива уменьшается. Такие явления должны учитываться при проектировании соответствующих систем управления.

Основной целью построения математической модели объекта управления является определение структуры объекта, его статических и динамических характеристик. Особенно важно определение структуры для многомерных и многосвязных объектов управления. В то же время для локальных объектов управления определение структуры может быть сведено к определению порядка дифференциального уравнения описывающего объекта. Кроме того, оцениваются входные сигналы и возмущения, действующие на объект (их статистические характеристики, точки приложения, максимальные амплитуды). Значение этих характеристик позволяет выбрать структуру регулятора и рассчитать параметры его настройки, ориентируясь также на критерий качества работы этой системы.

Передаточные функции типовых управляемых объектов различной физической природы приведены в табл. 1.1. Разумеется, эти передаточные функции соответствуют предельно упрощенному описанию управляемых объектов [21].

Т а б л и ц а 1.1

№ п/п	Передаточная функция $W(p)$	Переходная характеристика	Примеры	
1	2	3	4	
1	$k_{об}$		<p>a) </p> <p>б) </p>	<p>a) Ток и напряжение в электрической цепи</p> <p>б) Давление и поток жидкости в трубопроводе</p>
2	$\frac{k_{об}}{T_1 p + 1}$		<p>a) </p> <p>б) </p> <p>в) </p>	<p>a) Давление и поток в газопроводе</p> <p>б) Число оборотов электродвигателя</p> <p>в) Уровень жидкости в резервуаре</p>
3	$\frac{k_{об}}{T_2 p^2 + T_1 p + 1}$		<p>a) </p> <p>б) </p> <p>в) </p>	<p>a) Температура печи</p> <p>б) Напряжение генератора</p> <p>в) Число оборотов электродвигателя</p>
4			<p>г) </p> <p>д) </p>	<p>г) Число оборотов крупного электродвигателя</p> <p>д) Курс корабля</p>

1	2	3	4	
5	$\frac{k_{ог}}{p}$			Уровень жидкости в барабане котлоагрегата
6	$\frac{k_{ог}}{p(T_1 p + 1)}$			а) Угол поворота электропривода. б) Взаимное расположение самолетов
7	$\frac{k_{ог}}{p^2}$			Траектория ракеты, спутника
8	$\exp(-\tau p)$			а) Участок трубопровода, импульсная линия б) Ковшовый транспортер

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для выбора типа регулятора и параметров его настроек необходимо знать динамические характеристики объектов регулирования.

Для действующих промышленных объектов наиболее достоверные данные могут быть получены экспериментальным путем. Часто промышленные объекты являются сложными физическими системами, описываемыми нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка. Аналитическое определение их динамических свойств и линеаризация их характеристик по конструктивным и физическим данным являются чрезвычайно сложной задачей. Подобная оценка динамических свойств целесообразна лишь для проектируемых объектов.

Рассмотрим методику экспериментального определения динамических характеристик действующих объектов регулирования. Эта методика применима для объектов, представляющих собой устойчивые или нейтральные физические системы. Как известно, такие системы в структурных схемах можно представить в виде последовательно включенных типовых звеньев. Промышленные объекты, включающие в себя колебательные звенья, встречаются сравнительно редко. Обычно при проектировании подбирают параметры объектов так, чтобы они были хорошо демпфированы. Поэтому объект рассматривают как последовательное соединение звеньев 1-го порядка (апериодических и интегрального) и звена с чистым запаздыванием [12].

В настоящее время известно несколько методов определения динамических характеристик регулируемых объектов:

1. Методы, построенные на искусственном воздействии на систему непериодическим сигналом, мощность которого велика по сравнению с уровнем помех в системе. В качестве воздействия выбирается обычно скачкообразное изменение регулирующего воздействия, и в результате определяются временные характеристики.

2. Методы, построенные на искусственном воздействии на систему периодическими сигналами разной частоты, амплитуда которых велика по сравнению с уровнем помех в системе. В результате определяются частотные характеристики.

3. Методы, построенные на искусственном воздействии на систему синусоидальными сигналами, соизмеримыми с помехами в системе. В результате также определяются частотные характеристики.

4. Методы, не требующие искусственных воздействий, использующие возмущения, которые имеются в процессе нормальной эксплуатации.

Временной характеристикой объекта называют зависимость регулируемой величины от времени при скачкообразном изменении регулирующего воздействия. Применительно к объектам регулирования эту зависимость также называют кривой разгона.

На практике часто приходится сталкиваться с невозможностью построить кривую разгона полностью вследствие технологических ограничений, налагаемых на максимальные отклонения регулируемой величины. Тогда ограничиваются так называемой импульсной кривой разгона, которая представляет собой зависимость регулируемой величины от времени при скачкообразной подаче и последующем снятии регулирующего воздействия.

Практически из-за инерционности и ограниченности скорости перемещения регулирующих органов или других устройств обычно строят «искаженную» кривую разгона или «искаженную» импульсную кривую разгона.

**Схема опыта.** В сложном объекте (технологический процесс определяется различными величинами) выделяются регулируемые величины и регулирующие воздействия. Далее, поочередно определяется связь каждого регулирующего воздействия с регулируемыми величинами. При этом другие регулирующие воздействия и регулируемые величины поддерживаются, где это возможно, с помощью регуляторов или вручную на заданном уровне, чтобы они не влияли на результаты эксперимента. Нагрузку при этом необходимо стабилизировать. Например, в системе, изображенной на рис. 2.1, регулируемые величины  $y_1$  и  $y_4$  поддерживаются постоянными с помощью регуляторов  $Рег_1$  и  $Рег_4$ , регулирующее воздействие  $\mu_3$  – вручную для стабилизации режима во время снятия кривых разгона величин  $y_2$  и  $y_3$  при скачкообразном воздействии по  $\mu_2$  (объект во время снятия кривых разгона разомкнут по величинам  $y_2$  и  $y_3$ ). Этот этап работы должен проводиться

совместно с технологами данного производства и на базе приобретенного опыта при автоматизации аналогичных объектов.

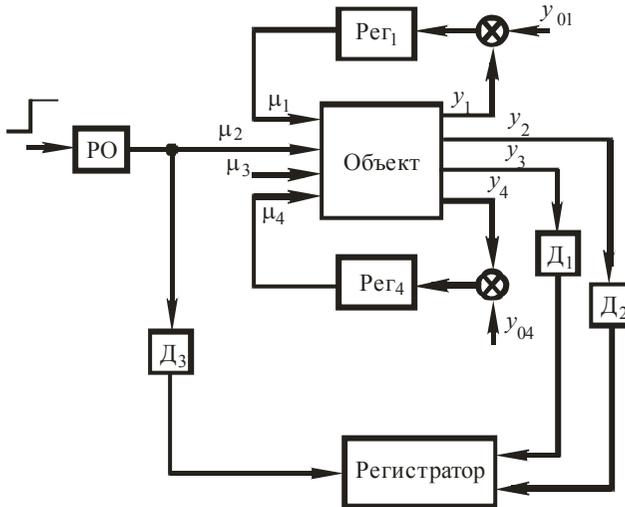


Рис. 2.1. Схема опыта для снятия кривых разгона с объекта регулирования:  
Рег<sub>1</sub>, Рег<sub>4</sub> – регуляторы; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub> – датчики; РО – регулирующий орган

В опытах очень важно правильно выбрать аппаратуру изменения регулируемых величин и регулирующих воздействий. Измерение и регистрация указанных величин должны производиться чувствительной и быстродействующей аппаратурой (постоянные времени аппаратуры должны быть малы по сравнению с постоянными времени объекта). Об этом можно судить либо по предварительным расчетам, либо после пробных опытов, имея данные об аппаратуре.

Вообще при подборе датчиков нужно отдавать предпочтение малоинерционным датчикам. Если же это невозможно, то при определении характеристик нужно использовать датчики и регистрирующие приборы, которые в дальнейшем войдут в качестве элементов в автоматическую систему регулирования (АСР). В этом случае целесообразно снимать совместные кривые разгона объекта, датчика и регистрирующего прибора.

**Выбор регулирующего воздействия.** В зависимости от конкретных условий в качестве регулирующего воздействия может рассматриваться как непосредственно регулирующее воздействие (расход греющей и охлаждающей среды, количество топлива, жидкости и т.п.), так и положение

регулирующего органа или сигнал исполнительному механизму. Последнее целесообразно лишь в том случае, если регулирующий орган или исполнительный механизм в дальнейшем будет использован в АСР данного объекта.

Если известно, что объект работает в широком диапазоне изменений регулирующих воздействий, то необходимо снять характеристики при нескольких начальных значениях этих воздействий, так как характеристики могут оказаться нелинейными. Часто линеаризация системы во всем диапазоне изменений регулирующего воздействия невозможна. При изменении последнего может оказаться, что меняются не только параметры объекта, но и его структура.

Это может происходить в АСР, программа которых (задаваемое значение регулируемой величины) и действующие на объект внешние возмущения меняются в широких пределах.

Если это допустимо по технологическим требованиям и осуществимо аппаратурно, то снимается кривая разгона, т.е. регулирующее воздействие изменяется скачкообразно (рис. 2.2, *a*). Если же по технологическим требованиям регулируемая величина в процессе исследования объекта может меняться только в узких пределах, то снимается импульсная кривая разгона. Форма изменения регулирующего воздействия для этого случая приведена на рис. 2.2, *б*, где  $t_{\text{и}}$  – длительность воздействия. В случаях, когда аппаратурно невозможно осуществить практически мгновенное изменение регулирующего воздействия, снимаются «искаженные» кривые разгона. Формы регулирующих воздействий для этих случаев приведены на рис. 2.2, *в* и *г*: рис. 2.2, *в* – для случая, когда устройство, изменяющее регулирующее воздействие, – инерционное звено первого порядка, рис. 2.2, *г* – для случая, когда ограничена скорость изменения регулирующего воздействия.

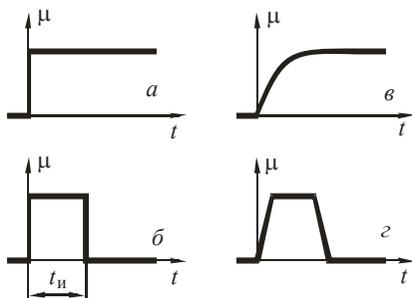


Рис. 2.2. Форма регулирующего воздействия

При выборе величины воздействий должны учитываться максимальное значение возможных эксплуатационных возмущений, нелинейность характеристик и уровень помех. Можно рекомендовать величину возмущения, равную 5–20% максимального значения (увеличение возмущения может привести к неточным результатам из-за нелинейности характеристик, уменьшение его при наличии помех затруднит обработку результатов).

**Порядок проведения опыта.** Прежде всего необходимо добиться установившегося состояния объекта по изучаемым регулируемым величинам. При выбранном начальном значении регулирующего воздействия значения регулируемых величин в объекте должны поддерживаться практически постоянными. Установившееся состояние может быть достигнуто стабилизацией внешних возмущений, а также других регулируемых величин и регулирующих воздействий, влияющих на исследуемые. Установившийся режим должен выдерживаться некоторое время в зависимости от динамических свойств объектов. Это время тем больше, чем больше время переходного процесса в объекте, которое обычно ориентировочно известно из пробных испытаний.

Далее, необходимо проверить стабильность нового установившегося состояния, т.е. состояния, которое будет устанавливаться после изменения регулирующего воздействия. Новый установившийся режим необходимо стабилизировать аналогично ранее рассмотренному.

После стабилизации установившихся состояний в объекте можно перейти к снятию характеристик. При одном из выбранных начальных значений подается 2–3 раза выбранное воздействие и регистрируются

регулируемые величины и регулирующее воздействие. Опыт повторяется для другого выбранного начального значения и т. д.

**Определение параметров переходного процесса.** Для процесса №2 (табл. 1.1) постоянная времени определяется по формуле

$$T = \frac{t_{0,7}}{1,2},$$

где  $t_{0,7}$  – время, при котором ордината  $y(t)$  достигает значения  $0,7k$ .

Для процесса №3 постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  можно определить с помощью диаграммы Ольденбурга и Сарториуса [2].

Порядок пользования диаграммой следующий.

На переходной характеристике провести касательную через точку перегиба (определение точки перегиба см. ниже) и определить значение времени  $T_C$  и  $T_A$ , как показано на рис. 2.3. На диаграмме (рис. 2.4) отношение  $T_C / T_A$  ( $0,73 \leq T_C / T_A \leq 1$ ) используется как значение точки пересечения прямой с каждой из осей. Прямая линия, проведенная таким образом, пересекает кривую на диаграмме в двух точках, каждая из которых позволяет определить отношение  $T_1 / T_A$  и  $T_2 / T_A$ . По этим отношениям легко определить  $T_1$  и  $T_2$ .

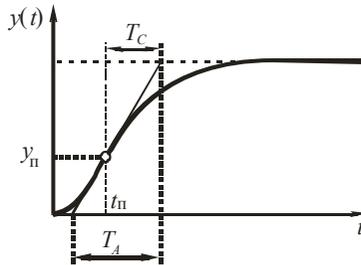


Рис. 2.3. Переходная характеристика системы

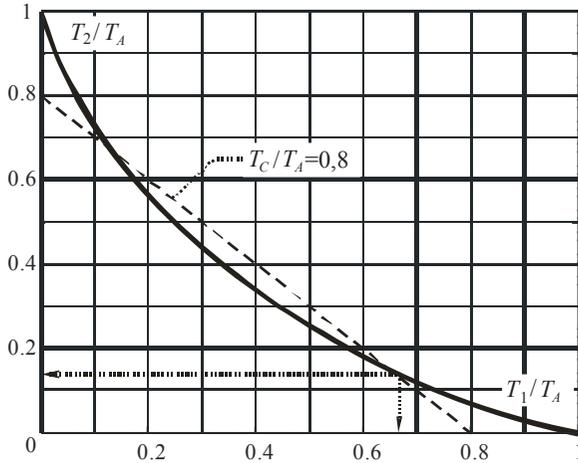


Рис. 2.4. Диаграмма Ольденбурга и Сарториуса

Под *точкой перегиба* понимается такая точка  $y(t)$ , в которой производная  $dy/dt$  имеет максимальное значение. Так как переходные функции многих промышленных объектов не имеют явно выраженной точки перегиба, то определение ее координат надо осуществлять следующим образом. В средней, наиболее быстро изменяющейся части графика  $y(t)$ , берется несколько координат  $y(t_i) = y_i, i = 0, 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  обычно не более 6–7;  $t_i - t_{i-1} = \Delta t = \text{const}$ , и вычисляются первые разности  $\Delta y_i = y_i - y_{i-1}, i = 0, 1, 2, \dots, m - 1$ . Далее находят максимальную величину  $\Delta y_i$ , соответствующее ей значение времени  $t_{\text{п}} = t_i - 0,5\Delta t$  и, наконец, ордината  $y_{\text{п}}$ .

Для процесса №4 постоянные времена  $T_1$  и  $T_2$  определяются из формул

$$T_1 = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad T_2 = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2},$$

где  $\alpha = -\frac{\ln(A_2/A_1)}{T_{\text{к}}}$ ;  $\beta = 2\pi/T_{\text{к}}$ ;  $A_1, A_2, T_{\text{к}}$  – характеристики переходного процесса, определяемые непосредственно из графика (рис. 2.5).

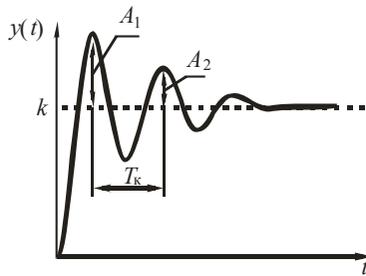


Рис. 2.5. Переходная характеристика системы

Для процесса №5 коэффициент передачи объекта определяется из формулы

$$k_{об} = \operatorname{tg} \alpha ,$$

где  $\alpha$  – угол наклона переходной характеристики от оси абсцисс.





фазовым пространством, а траекторию изображающей точки – фазовой траекторией.

Фазовым портретом системы называется совокупность фазовых траекторий, полученных при различных начальных условиях.

Приведем иллюстрации фазовых портретов линейных систем, описываемых уравнениями второго порядка с постоянными коэффициентами. Предположим, что дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} - a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0x(t) = b_0y(t)$$

описывает поведение некоторой динамической системы. Тогда характеристическое уравнение системы и его решение примет вид

$$p^2 - a_1p + a_0 = 0, \quad p_{1,2} = \frac{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2}.$$

Устойчивость и качество системы в малом зависит от корней характеристического уравнения  $p_{1,2}$ , которые определяются его коэффициентами  $a_1$  и  $a_0$ .

Приведем координатную плоскость, выбрав  $a_1$  и  $a_0$  в качестве ее координат. Разобьем эту плоскость на области, соответствующие качественно различному поведению рассматриваемой системы (рис. 3.1).

Область 1, в которой процессы устойчивы и апериодические. Точка равновесия типа «устойчивый узел».

Область 2, в которой процессы устойчивы и колебательные. Точка равновесия типа «устойчивый фокус».

Область 3, в которой процессы неустойчивы и колебательные. Точка равновесия типа «неустойчивый фокус».

Область 4, в которой процессы неустойчивы и апериодические. Точка равновесия типа «неустойчивый узел».

Область 5, в которой процессы неустойчивы. Точка равновесия типа «седло».

На границе областей 2 и 3 в системе возникают незатухающие колебания, амплитуда которых зависит от начальных условий. Точка равновесия типа «центр».

С точки зрения фазовых представлений движения задача управления сводится либо к перемещению изображающей точки из некоторой допустимой области начальных условий в заданную точку (или область) фазового пространства, либо к обеспечению движения изображающей точки по некоторой заданной траектории. Вид траектории, по которой осуществляется переход системы из одного состояния в другое, позволяет судить о динамических свойствах системы (время переходного процесса, перерегулирования, колебательность, точность и т.п.). Синтез методом фазового пространства предполагает выбор такого управления, которое обеспечивает этот переход по желаемым траекториям.

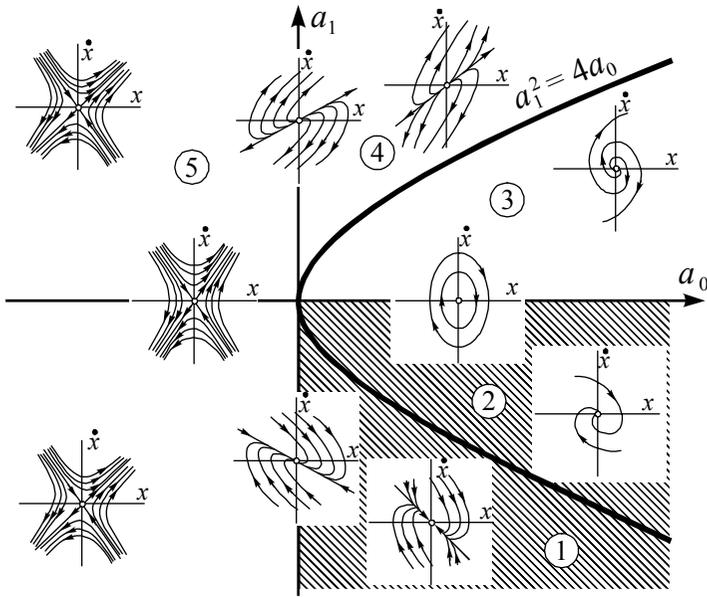


Рис. 3.1. Плоскость фазовых портретов

Одним из достоинств рассматриваемого метода синтеза является возможность изменения совокупности фиксированных структур, при которой в системе удастся как сочетать полезные свойства каждой структуры, так и получать новые свойства, не присущие ни одной из них. Более подробное этот метод синтеза изложен в работах [8, 9, 16, 18, 20], здесь приведем лишь основные идеи, которые могут быть положены в основу построения систем с переменной структурой.

### 3.2. Понятие систем с переменной структурой

Большие дополнительные возможности улучшения процессов регулирования дает нелинейное управление работой объекта путем изменения структуры управляющего устройства в зависимости от размеров и знаков входных величин, поступающих в управляющее устройство от измерительного устройства.

При этом могут использоваться комбинации линейных законов регулирования (их достоинства, обходя недостатки). Например, если известно, что при одном законе регулирования получается быстрое начальное изменение регулируемой величины, но с большими последующими колебаниями, а при другом линейном законе регулирования – медленное изменение, но плавный подход к новому установившемуся режиму, то можно, включив сначала первый закон, переключить затем систему на второй закон в некоторой точке  $A$ , когда отклонение  $y$  достигнет определенного значения  $y_A$ . В результате процесс регулирования изобразится кривой (рис. 3.2), объединяющей оба качества – быстроту и плавность процесса. Используя данный подход, мы получаем процесс регулирования без характерных для ПИ- и ПИД-регуляторов колебаний и перерегулирования, при малом времени регулирования.

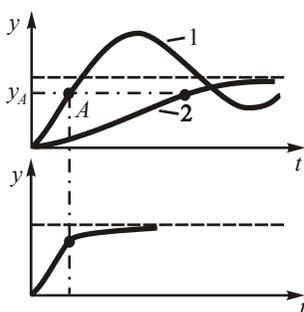


Рис. 3.2. Принцип работы системы с переменной структурой

Если в такой системе с переменной структурой все звенья линейны, то за счет указанного переключения, происходящего автоматически в процессе регулирования, система становится нелинейной. Это можно сравнить с тем, как получается нелинейная статическая характеристика из отрезков прямых линий. Но здесь имеет место нелинейная динамическая характеристика,

составляемая из последовательности разных линейных дифференциальных уравнений, соответствующих первому и второму законам регулирования.

Выбор структуры системы осуществлялся исходя из предположения, что совокупность функциональных элементов и характер связей между ними остаются раз и навсегда неизменными. Однако такой взгляд на проектирование систем управления, вообще говоря, не является единственным. Действительно, при синтезе управляющего устройства можно заранее ввести в структуру системы такие функциональные элементы, которые во время протекания процесса управления скачкообразно меняют знак обратной связи, коэффициенты воздействия по различным координатам и т.д., т.е. изменяют структуру системы. Тогда в зависимости от выбранного алгоритма и имеющейся информации система будет обладать той или иной структурой. Можно предположить, что в такой системе удастся сочетать полезные свойства каждой из имеющейся совокупности структур, а быть может, и получить какие-либо новые свойства, не присущие любой из них. Следует ожидать, что такой подход позволит существенно повысить качество управления.

Рассмотрим систему с перестраиваемой структурой. В дальнейшем под системами с переменной структурой (СПС) будем понимать системы, в которых связи между функциональными элементами меняются тем или иным образом в зависимости от состояния системы. В таких системах управляющее устройство содержит функциональные элементы, которые перестраиваются на реализацию конкретного логического алгоритма из заданного класса.

На рис. 3.3 представлена достаточно общая схема СПС. В зависимости от того, какие координаты системы и внешние воздействия доступны для измерения, на вход управляющего устройства (УУ) может поступать информация о величине ошибки  $\varepsilon$ , выходной координате исполнительного устройства  $\mu$ , задающем и возмущающем воздействиях  $s(t)$  и  $f(t)$ , о регулируемой величине  $y$ , о промежуточных координатах объекта  $y_1, \dots, y_i$  и исполнительного устройства  $\mu_1, \dots, \mu_k$ . Управляющее устройство содержит некоторую совокупность функциональных звеньев, причем оператор каждого из них обозначен на рис. 3.3 аббревиатурой  $\Phi Z$  с соответствующими индексами. Каждая из входных величин управляющего устройства может поступать на входы только «своих» звеньев. Управляющее воздействие  $u$  является суммой выходных величин всех звеньев. В УУ имеются ключевые

элементы (КЭ). Каждый КЭ замыкает один из предусмотренных каналов передачи информации. Всевозможные сочетания положений контактов КЭ определяют совокупность имеющихся в распоряжении фиксированных структур. Блок изменения структуры (БИС) на основе анализа всей поступающей на УУ информации дает команду на изменение структуры системы. Задача синтеза такой СПС состоит в выборе операторов всех звеньев и логических законов, в соответствии с которыми изменяется структура системы.

На рис. 3.4 представлена обобщенная схема автоматического регулирования с перестраиваемой структурой. В схему входит блок измерения (ИЗУ), который производит непрерывную оценку регулируемой величины и вычисляет величину сигнала рассогласования, который подается на блок формирователя функции переключения, осуществляющий анализ и переключение сигнала отклонения регулируемой величины  $\varepsilon(t)$  на необходимый закон регулирования (блок коммутируемых коэффициентов).

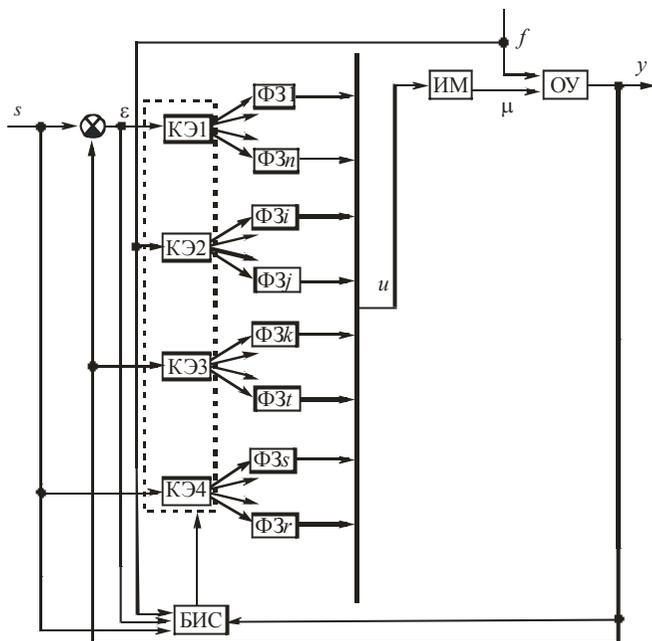


Рис. 3.3. Общая структурная схема системы с перестраиваемой структурой

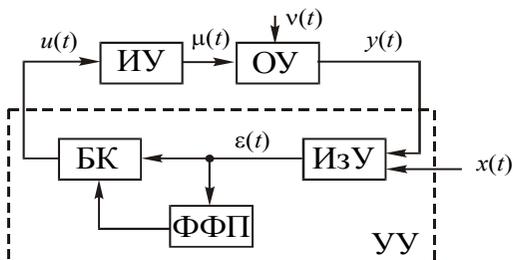


Рис. 3.4. Схема автоматического регулирования с перестраиваемой структурой:  
 БК – блок коммутируемых коэффициентов; ИзУ – измерительное устройство;  
 ФФП – блок формирования функции переключения;  
 ИУ – исполнительное устройство

### 3.3. Метод фазового пространства

Пусть линейная система описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = 0,$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$  – постоянные величины.

Если  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – корни характеристического уравнения (предполагается, что кратные корни отсутствуют), то

$$x^{(j)} = \sum_{j=1}^n A_j \lambda_j^{i-1} \exp(\lambda_j t), \quad i = 0, \dots, n-1,$$

где  $A_j$  – постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий;  $x^{(j)}$  – координаты фазового пространства  $X$ .

Очевидно, что линейная структура устойчива или любая траектория в фазовом пространстве  $X$  стягивается к началу координат, если  $\text{Re} \lambda_j < 0$  ( $j = 1, \dots, n$ ). В рассмотренном случае это области 1 и 2 на рис. 3.1.

Предположим, что в нашем распоряжении имеются две, даже неустойчивые, линейные структуры, но в фазовом пространстве у одной из них существует гиперплоскость с устойчивым вырожденным движением. Тогда следует выбрать такую последовательность изменения этих структур, чтобы, во-первых, любая траектория в пространстве  $X$  пересекла эту гиперплоскость и, во вторых, после момента попадания изображающей точки

на нее в системе имела место структура с устойчивым вырожденным движением. Построенная таким образом система будет устойчивой для любых начальных условий.

Пусть первой структуре соответствует фазовый портрет на рис. 3.5, а, а второй – рис. 3.5, б.

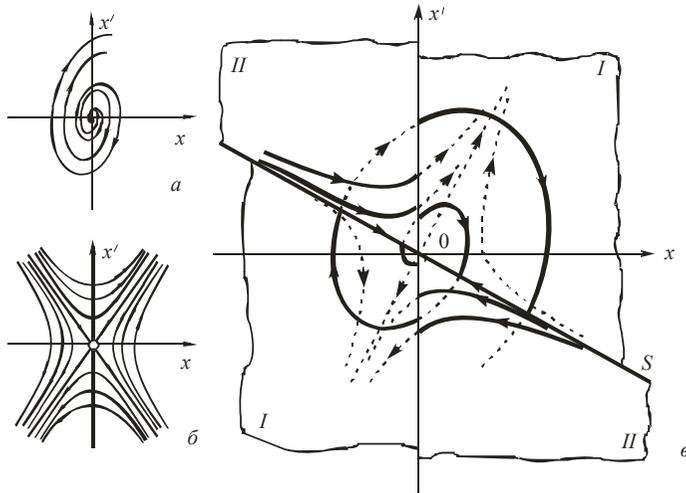


Рис. 3.5. Фазовые портреты

Возникает задача: выбрать такую последовательность изменения структур, чтобы любое движение системы было устойчиво. Разобьем фазовую плоскость  $(x, x')$  на два листа, границами которых являются прямая  $S$  и ось  $x'$  (рис. 3.5, в). Если состояние системы таково, что изображающая точка находится на листе  $I$ , то ее движение должно происходить по раскручивающимся спиральям (система должна иметь первую структуру). На листе  $II$  изображающая точка должна двигаться по кривым гиперболического типа (система должна иметь вторую структуру). Из рис. 3.5, в видно, что изображающая точка всегда попадает на прямую  $S$ , которая является устойчивой траекторией для второй структуры. Такой подход позволяет построить устойчивую систему и отказаться от требования расположения корней в левой комплексной полуплоскости для каждой из имеющихся структур.

Другой способ, который может быть положен в основу построения системы с переменной структурой, целесообразно использовать в случае,

если фазовое пространство для каждой из фиксированных неустойчивых структур не содержит гиперплоскостей с устойчивыми вырожденными движениями. За счет «сшивания» в определенной последовательности участков неустойчивых траекторий удастся в итоге получить устойчивое движение для любых начальных условий. В качестве примера рассмотрим случай, когда в нашем распоряжении имеются две линейные структуры, находящиеся на границе устойчивости. Соответствующие им фазовые портреты представлены на рис. 3.6. Пусть в первом и третьем квадрантах плоскости  $(x, x')$  фазовыми траекториями изображающей точки являются траектории рис. 3.6, *а*, а во втором и четвертом квадрантах – фазовые траектории рис. 3.6, *б*. Очевидно, что если изменение структуры происходит на координатных осях и фазовая траектория системы имеет вид, представленный на рис. 3.7, то при любых начальных условиях движение в системе будет устойчивым.

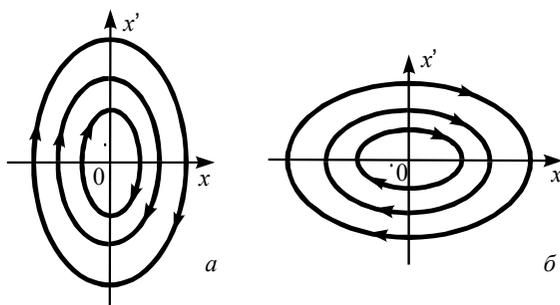


Рис. 3.6. Фазовые портреты в линейных структурах

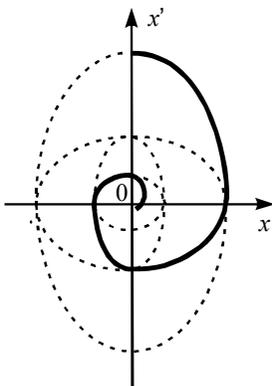


Рис. 3.7. Фазовая траектория в СПС

Наиболее плодотворной идеей синтеза систем с переменной структурой оказалась идея создания искусственных вырожденных движений.

Сущность этого подхода заключается в следующем: в фазовом пространстве  $X$  задается некоторая гиперплоскость  $S$ , движение в которой обладает желаемыми свойствами, причем траектории, лежащие в  $S$ , не принадлежат ни одной из имеющихся структур. Последовательность изменения структур должна быть выбрана такой, чтобы изображающая точка всегда попадала на эту гиперплоскость, а затем двигалась по ней. Тогда с момента попадания в системе будет существовать искусственное вырожденное движение, которое можно наделить рядом полезных свойств, не присущих каждой из фиксированных структур. Идея создания искусственных вырожденных движений может быть проиллюстрирована на следующем примере. Пусть по-прежнему в системе предусмотрена возможность использования двух фиксированных линейных структур, которым соответствуют фазовые портреты рис. 3.8, *а* и 3.8, *б*. Предположим далее, что изменение структуры системы осуществляется на оси  $x'$  и на прямой  $S^*$ , которая не является фазовой траекторией ни для одной из имеющихся структур (рис. 3.8, *в*). Ось  $x'$  и прямая  $S^*$  разбивают фазовую плоскость на два листа, причем на листе *I* изображающая точка движется по эллиптическим кривым, а на листе *II* – по гиперболическим кривым. Очевидно, что из любого начального положения изображающая точка попадает на границу  $S^*$ . Если угловой коэффициент прямой  $S^*$  больше углового коэффициента прямой  $S$ , то в окрестности  $S^*$  фазовые траектории будут направлены встречно (рис. 3.8, *в*). Тогда, попав на  $S^*$ , изображающая точка в дальнейшем ее не покинет, т.е. прямая  $S^*$  является фазовой траекторией. Таким образом удается обеспечить существование вырожденных движений.

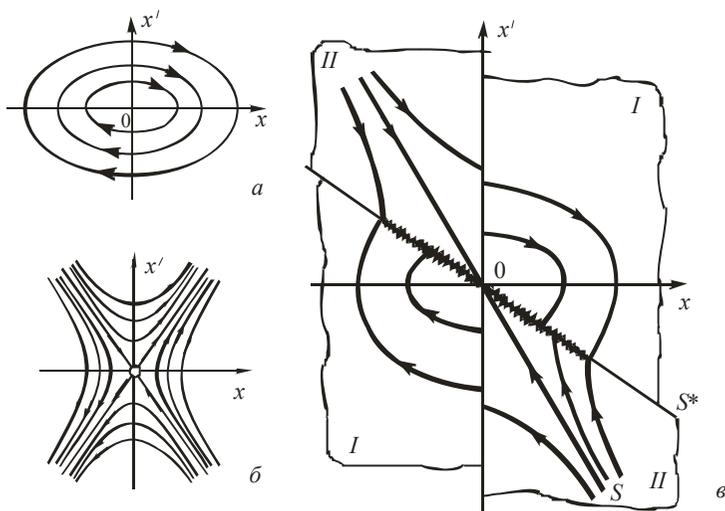


Рис. 3.8. Фазовые портреты

### 3.4. Типы движения в системах с переменной структурой

При построении систем с ограниченной информацией о состоянии управляемого процесса, а также систем при наличии ограничений на уровни воздействий по различным координатам системы параметры управляющего устройства выбирались таким образом, чтобы, по крайней мере, одна из линейных структур имела устойчивое вырожденное движение. В момент попадания изображающей точки на фазовую траекторию, соответствующую устойчивому вырожденному движению, происходило переключение управления, т.е. замена одной линейной структуры на другую. В дальнейшем условимся называть прямой, на которой осуществляется изменение структуры системы, прямой переключения.

Из-за неточного знания параметров объекта, неточностей аппаратурной реализации, вызванных нестабильностью характеристик элементов управляющего устройства, и других технических причин не удастся обеспечить изменение структуры системы строго в требуемые моменты времени. Поэтому в системах с перестраиваемой структурой могут возникать различные виды движения. Покажем основные режимы движения, которые могут наблюдаться в этом классе систем.

Рассмотрим систему с перестраиваемой структурой второго порядка, описываемую следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -a_2x_2 - a_1x_1 - bu, \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $a_1, a_2, b - \text{const}, b > 0$ .

Специфика всех видов движения может быть полностью выявлена на примере системы, для которой управление имеет вид

$$u = \Psi x_1; \quad (3.6)$$

$$\Psi = \begin{cases} \alpha \text{ при } x_1 s > 0, \\ \beta \text{ при } x_1 s < 0; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$s = x_2 + cx_1, \quad (3.8)$$

где  $\alpha, \beta, c - \text{постоянные коэффициенты}, c > 0, \alpha > \beta$ .

Согласно (3.7), (3.8), изменение структуры управляющего устройства происходит на прямых переключения  $x_1 = 0$  и  $S$ , заданной на плоскости  $(x_1, x_2)$  уравнением  $s = 0$ .

Не нарушая общности рассуждений, можно для определенности считать, что при  $\Psi = \alpha$  линейная структура (3.7) является колебательно неустойчивой, а при  $\Psi = \beta - \text{апериодически неустойчивой}$ . Для второй структуры существует устойчивое вырожденное движение, определяемое отрицательным корнем  $\lambda$  характеристического уравнения.

В случае равенства коэффициента  $c$ , определяющего положение прямой переключения на фазовой плоскости  $(x_1, x_2)$ , величине  $-\lambda$  в системе возникает такой режим работы, при котором изменение структуры системы происходит на фазовой траектории, соответствующей устойчивому вырожденному движению (рис. 3.9, а), будем называть *режимом работы с движением по вырожденным траекториям*.

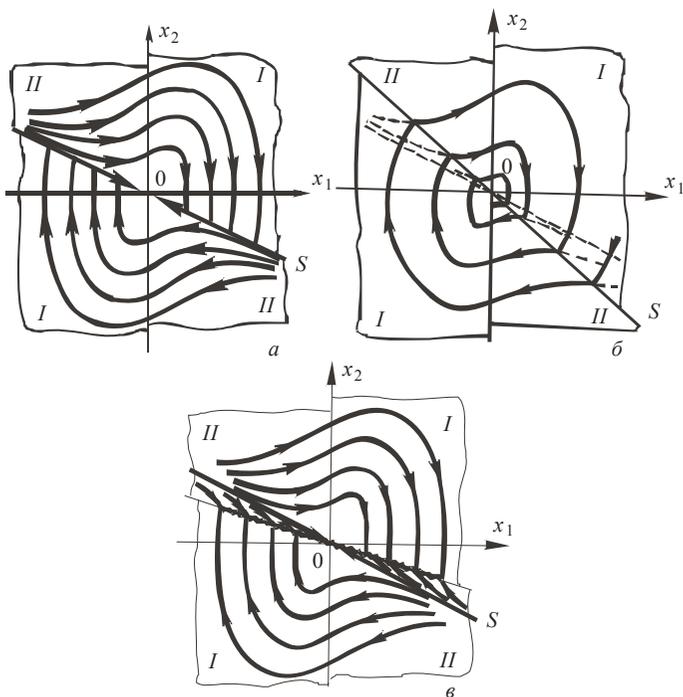


Рис. 3.9. Фазовые портреты, получаемые в СПС

Предположим теперь, что угловым коэффициентом  $c$  прямой переключения больше  $-\lambda$ . Тогда устойчивая траектория линейной структуры, определяемая  $\Psi = \beta$ , будет целиком принадлежать листу  $I$  ( $x_1 s > 0$ ), на котором движение изображающей точки происходит по раскручивающимся спиральям, соответствующим линейной структуре  $\Psi = \alpha$  (рис. 3.9, б). В этом случае после попадания на прямую переключения  $S$  изображающая точка будет уходить от нее, двигаясь по кривым гиперболического типа. При изменении знака  $x_1$  произойдет смена структуры системы. Затем изображающая точка, двигаясь по раскручивающимся спиральям, вновь попадет на прямую переключения  $S$  и т.д. Очевидно, что в описанной системе с некоторой конечной частотой будет изменяться структура управляющего устройства. Такой режим работы системы будем называть *режимом переключений*. Как видно из фазового портрета, при выбранном значении  $c$  система устойчива, но положение равновесия достигается в колебательном режиме.

Рассмотрим случай, когда угловой коэффициент  $c$  прямой переключения меньше  $-\lambda$ . При таком соотношении параметров системы траектория, характеризующая устойчивое вырожденное движение, принадлежит листу  $\Pi$  ( $x_1 s < 0$ , рис. 3.9, в) и фазовые траектории, а точнее говоря, векторы фазовых скоростей обеих структур, в окрестности прямой переключения  $S$  направлены к  $S$ . После попадания изображающей точки на прямую  $S$  в системе с бесконечно большой частотой возникают переключения структуры системы с одной на другую. При этом на фазовой плоскости изображающая точка будет двигаться вдоль прямой переключения. Такой режим работы, при котором на прямой переключения изменение структуры происходит с бесконечно большой частотой, будем называть *скользящим режимом*. Заметим, что прямая переключения не является фазовой траекторией ни для одной из линейных структур. Следовательно, за счет скользящего режима удастся получить искусственное вырожденное движение. Поэтому остановимся подробнее на уравнениях движения системы в скользящем режиме и условиях его возникновения.

Из того факта, что изображающая точка, попав на прямую переключения, уже не может сойти с нее и продолжает свое движение по ней, следует равенство нулю величины  $s$  в скользящем режиме, т. е.

$$x_2 + cx_1 = 0. \quad (3.9)$$

Имея в виду, что величина ошибки  $x$  равна  $x_1$ , а  $dx/dt = x_2$ , получаем из (3.9) дифференциальное уравнение движения системы в скользящем режиме относительно координаты ошибки:

$$dx/dt + cx = 0. \quad (3.10)$$

Согласно (3.10), движение рассматриваемой системы в скользящем режиме описывается уже уравнением первого порядка, и, что особенно важно, это уравнение не зависит от параметров неизменяемой части системы. Выбирая соответствующим образом коэффициент  $c$ , мы можем наделить движение системы в скользящем режиме желаемыми свойствами. Например, для устойчивости достаточно выбрать  $c > 0$ , а увеличивая  $c$ , можно повысить скорость затухания этого движения. Особенность скользящих движений, связанная с независимостью их от характеристик управляемого объекта и возможностью наделить их желаемыми свойствами, и обуславливает широкое использование в СПС этого вида движения.

Финальная стадия процесса управления всегда будет протекать в скользящем режиме, если при выбранных линейных структурах управляющего устройства и при выбранной последовательности их изменения в любой точке прямой переключения  $S$  существует скользящий режим, а изображающая точка из любого начального положения попадает на  $S$ .

Условие существования скользящего режима на прямой  $S$  можно получить, исходя из того, что в окрестности  $S$  векторы фазовых скоростей обеих структур должны быть направлены навстречу друг другу.

Предположим, что изображающая точка отклонилась от прямой переключения на некоторое расстояние. Пусть для определенности величина  $s$ , характеризующая это отклонение, положительна,  $s > 0$ . Для того чтобы изображающая точка вернулась на  $S$ , в системе должна включиться такая линейная структура, при которой величина  $s$  будет убывать, т.е.  $ds/dt < 0$ . С помощью аналогичных рассуждений можно убедиться в том, что для отклонений  $s < 0$  должна быть такая структура, при которой  $ds/dt > 0$ . Отсюда получаем условие, которое должно выполняться в окрестности  $S$  для того, чтобы на этой прямой существовал скользящий режим:

$$s \cdot ds/dt < 0. \quad (3.11)$$

Если данное неравенство выполняется для любой точки прямой переключения  $S$ , т.е. на всей прямой  $S$  существует скользящий режим, то условимся называть в этом случае прямую  $S$  *прямой скольжения*.

Таким образом, динамическое изменение структуры управляющего устройства дает дополнительные возможности по улучшению процессов регулирования.

## 4. СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ

### 4.1. Управление объектами без запаздывания

Рассмотрим задачу управления линейным объектом, если неизменяемая часть описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$x'' + a_2 x' + a_1 x = -bu. \quad (4.1)$$

Обозначим  $x = x_1$ ,  $x' = x_2$  и вместо (4.1) будем рассматривать систему

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -a_2 x_2 - a_1 x_1 - bu, \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$  – постоянные величины,  $b > 0$ . Пусть в нашем распоряжении имеется информация о величине ошибки и о знаке некоторой линейной комбинации ошибки и ее производной. Для различных технологических процессов коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  могут оказаться такими, что при имеющейся информации за счет использования линейного закона управления не удастся обеспечить устойчивого движения в системе, не говоря уже о качественных показателях переходного процесса.

Задача синтеза регулятора с перестраиваемой структурой, для рассматриваемого объекта, состоит в выборе каждой из структур регулятора (или в простейшем случае значений коэффициентов передачи  $\alpha$  и  $\beta$ ) и последовательности их изменения. Для синтеза будем использовать метод фазового пространства, описанный выше.

Для этой цели рассмотрим фазовые портреты линейных систем второго порядка. Выберем одну из структур регулятора таким образом, чтобы при ней в фазовой плоскости существовала траектория, соответствующая устойчивому вырожденному движению (область 5, рис. 3.1). Пусть эта структура имеет место при  $\Psi = \beta$ . Из характеристического уравнения системы  $p^2 + a_2 p + (a_1 + b\beta) = 0$  следует, что такое  $\beta < 0$  всегда найдется. Фазовый портрет будет иметь вид, представленный на рис. 3.5, б. Во втором и четвертом квадранте расположена траектория с устойчивым вырожденным движением, которая является прямой с угловым коэффициентом  $\lambda$ , равным

отрицательному корню характеристического уравнения. Выберем вторую линейную структуру таким образом, чтобы корни характеристического уравнения  $p^2 + a_2 p + (a_1 + b\alpha) = 0$  были комплексными. Очевидно, что такое  $\alpha > 0$  всегда найдется. Пусть вторая структура также неустойчива (область 3, рис. 3.1).

Разобьем фазовую плоскость на два листа (рис. 3.5, а), границами которых являются прямые  $x_1 = 0$  и прямая  $S$ , заданная уравнением

$$s = x_2 - \lambda x_1 = 0,$$

которая является траекторией с устойчивым движением для одной из структур. Если состояние системы таково, что изображающая точка находится на листе  $I$ , то необходимо обеспечить ее движение по раскручивающимся спиральям, а на листе  $II$  – по кривым гиперболического типа. Изображающая точка, двигаясь из любого начального положения по участкам неустойчивых траекторий, всегда попадает на прямую  $S$  (из листа  $I$  – за один интервал, из листа  $II$  – за два интервала) и затем, двигаясь по  $S$ , асимптотически приближается к началу координат.

Таким образом, закон управления принимает вид

$$u = \Psi x_1, \tag{4.3}$$

где

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } x_1 s > 0, \\ \beta & \text{при } x_1 s < 0, \end{cases}$$

$$s = x_2 - \lambda x_1.$$

Подводя итог, напомним, что коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  должны выбираться таким образом, чтобы линейная структура, соответствующая  $\Psi = \alpha$ , была колебательной, а линейная структура, соответствующая  $\Psi = \beta$ , имела устойчивое вырожденное движение. Коэффициент  $\lambda$ , характеризующий скорость затухания этого устойчивого движения, определяет величину  $s$  в логическом законе изменения структуры.

Как видно из (4.3), для реализации синтезированного закона управления необходима информации о величине ошибки и о знаке линейной комбинации ошибки и ее производной, которой мы и располагаем.

Таким образом, в классе систем с переменной структурой всегда можно обеспечить устойчивость системы второго порядка без введения воздействия по производной на вход неизменяемой части системы.

## **4.2. Управление объектами, имеющими величину запаздывания**

При построении систем автоматического регулирования технологическими процессами весьма часто оказывается, что контур управления обладает чистым запаздыванием. Также следует отметить, что во многих случаях динамические системы высоких порядков с достаточной степенью точности аппроксимируются системой первого или второго порядка с запаздыванием. Аналогично, как и при построении линейных систем без запаздывания, задача синтеза управляющего устройства заключается в выборе соответствующих коэффициентов воздействия по координате ошибки. Отличительной особенностью для линейных систем с запаздыванием является тот факт, что попытка увеличить коэффициент передачи регулятора в конечном итоге неминуемо приводит к потере устойчивости.

Пусть объект регулирования имеет передаточную функцию вида

$$W(p) = \frac{b \exp(-\tau p)}{p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Если управление в системе осуществляется за счет некоторой фиксированной линейной структуры с использованием только воздействия по координате ошибки, т.е.

$$u = \alpha \cdot \varepsilon, \quad \alpha > 0,$$

где  $u$  – управляющее воздействие;  $\varepsilon$  – ошибка регулирования, то при увеличении уровня воздействия система становится колебательной, а затем неустойчивой. Выберем  $\alpha$  таким образом, чтобы при нулевых начальных условиях продолжительность первой полуволны процесса  $t_p$  удовлетворяла техническим требованиям, предъявляемым к времени переходного процесса.

Обеспечим переходный процесс в системе с продолжительностью, близкой к величине  $t_p$  за счет сочетания конечного числа структур, отличных друг от друга лишь уровнем воздействия по координате ошибки.

Для этой цели система автоматического регулирования должна за время протекания переходного процесса трижды сменить структуру: сначала объект должен быть охвачен отрицательной обратной связью, затем на интервале продолжительностью  $(t_p - \tau) - t_1$ , причем  $t_1 < (t_p - \tau)$  – положительной обратной связью, и, наконец, с момента  $t_p - \tau$  система становится разомкнутой. Чем величина  $t_1$  ближе к  $t_p - \tau$ , тем меньше переходный процесс будет отличаться от первой полуволны.

Для построения системы с перестраиваемой структурой, в которой реализуется описанный переходный процесс, необходимо найти закон изменения структуры в функции координат системы. При произвольном постоянном воздействии строим переходный процесс, выбрав моменты переключения  $t_1$  и  $t_p - \tau$ . Определим, при каких значениях  $\varepsilon$  и  $d\varepsilon/dt$  эти переключения должны иметь место. В силу того, что каждая из рассматриваемых структур является линейной, для любого постоянного воздействия отношение  $(d\varepsilon/dt)/\varepsilon$  для различных процессов в моменты переключения будет неизменным. В итоге получим две прямые переключения:

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{d\varepsilon}{dt} + c_1\varepsilon = 0, \\ s_2 &= \frac{d\varepsilon}{dt} + c_2\varepsilon = 0, \end{aligned} \tag{4.4}$$

где значения  $c_1$  и  $c_2$  находятся по построенным кривым переходного процесса:

$$c_1 = -\frac{d\varepsilon(t_1)/dt}{\varepsilon(t_1)}, \quad c_2 = -\frac{d\varepsilon(t_p - \tau)/dt}{\varepsilon(t_p - \tau)}. \tag{4.5}$$

Таким образом, закон управления с перестраиваемой структурой для объектов с чистым запаздыванием будет выглядеть как

$$u = \Psi \cdot \varepsilon, \tag{4.6}$$

где

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } \varepsilon s_1 > 0, \\ \beta & \text{при } s_2 s_1 < 0, \\ 0 & \text{при } \varepsilon s_2 < 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

В итоге в системе будет иметь место одна из трех возможных линейных структур в зависимости от того, на каком из трех листов находится изображающая точка в фазовом пространстве.

Коэффициент передачи второй линейной структуры  $\beta$  можно выбрать из условия, что система в момент переключения на вторую линейную структуру должна быть охвачена положительной обратной связью и ее фазовая траектория направлена в противоположном направлении движения траектории первой линейной структуры (при коэффициенте  $\alpha$ ).

Применение принципа переменности структуры в системах с запаздыванием в контуре управления позволяет получить аperiodические процессы за счет воздействия лишь по координате ошибки и использования информации о знаках линейных комбинаций ошибки и ее производной.

Таким образом, в рассматриваемой задаче используются три линейные структуры: с отрицательной, положительной и разомкнутой обратной связью, причем каждая из двух линейных структур, соответствующих замкнутой системе, может быть как устойчивой, так и неустойчивой.

### **4.3. Интегральный регулятор с переменной структурой**

При управлении технологическими процессами с взаимосвязанными параметрами лучшие технологические показатели достигаются при таких изменениях регулирующих воздействий, которые необходимы, согласно статическим характеристикам объектов, только для компенсации возмущений [14].

Интегральный регулятор с перестраиваемой структурой обеспечивает управление минимальными изменениями регулирующих воздействий инерционными объектами. Регулятор состоит из следящего контура (рис. 4.1), вырабатывающего вспомогательную координату  $s$ , и логического устройства, которые в зависимости от сочетания знаков вспомогательных координат  $\varepsilon^*$ ,  $s$ ,  $\sigma$  формируют логический закон управления  $\chi$  с целью

изменения структуры системы. При определенных сочетаниях знаков координат  $\varepsilon^*$ ,  $s$ ,  $\sigma$  канал управления открывается для передачи сигнала ошибки  $\varepsilon$  на интегратор.

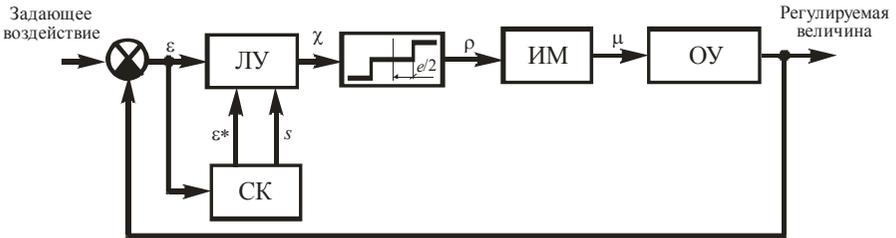


Рис. 4.1.Обобщенная структурная схема системы с интегральным регулятором с переменной структурой: ЛУ – логическое устройство; СК – следящий контур; ИМ – исполнительный механизм; ОУ – объект управления

Дифференциальное уравнение регулятора имеет вид

$$T_s \mu' = \rho,$$

где

$$\rho = \begin{cases} 1 & \text{при } \chi > \frac{e}{2}, \\ 0 & \text{при } -\frac{e}{2} \leq \chi \leq \frac{e}{2}, \\ -1 & \text{при } \chi < -\frac{e}{2}. \end{cases}$$

Здесь  $e$  – зона нечувствительности релейного элемента;

$$v = U_1(\varepsilon^*, s)x,$$

где

$$U_1(\varepsilon^*, s) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varepsilon^* \cdot s \leq 0, \\ 1 & \text{при } \varepsilon^* \cdot s > 0. \end{cases}$$

Здесь  $\varepsilon^* = \text{sgn } \varepsilon$  – знак сигнала ошибки регулирования;  $s = \varepsilon' + c \cdot \varepsilon$  – прямая переключения;  $c$  – коэффициент наклона прямой;

$$\chi = U_2(\sigma)v,$$

где

$$U_2(\sigma) = \begin{cases} 1 & \text{при } \sigma = 0, \\ 0 & \text{при } \sigma = 1, \end{cases} \quad \sigma = \begin{cases} 1 & \text{при } \lambda > e, \\ 0 & \text{при } \lambda \leq e; \end{cases}$$

$$\lambda = \alpha + \beta, \quad \alpha = U_4(s, \xi)\psi;$$

$$U_4(s, \xi) = \begin{cases} 1 & \text{при } s = 0, \xi = 1, \\ 0 & \text{при } \begin{cases} s = 0, \xi = 0, \\ s \neq 0, \xi = 0, \end{cases} \end{cases} \quad \xi = \begin{cases} 1 & \text{при } \vartheta > e, \\ 0 & \text{при } \vartheta \leq e. \end{cases}$$

Здесь  $\vartheta$  – решение линейного дифференциального уравнения

$$T_1 \vartheta' + \vartheta = \gamma,$$

$$\gamma = U_3(v, \sigma)V_1, \text{ где } V_1 = \text{const};$$

$$U_3(v, \sigma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \begin{cases} v = 0, \sigma = 0, \\ v \neq 0, \sigma = 1, \end{cases} \\ 1 & \text{при } v \neq 0, \sigma = 0, \end{cases} \quad \beta = U_5(\sigma)\psi, \quad U_5(\sigma) = \begin{cases} 1 & \text{при } \sigma = 1, \\ 0 & \text{при } \sigma = 0. \end{cases}$$

Здесь  $\psi$  – решение нелинейного дифференциального уравнения

$$T(\sigma)\psi' + \psi = v,$$

$$T(\sigma) = \begin{cases} T_0 & \text{при } \sigma = 0, \\ T_1 & \text{при } \sigma = 1, \end{cases} \quad v = U_2(\sigma)V_2, \text{ где } V_2 = \text{const}.$$

На рис. 4.2 приведен пример обработки задающего воздействия рассматриваемой системой. В момент времени  $t = 25$  с на объект действует внешнее координатное возмущающее воздействие  $f$ , равное +100% от задающего воздействия.

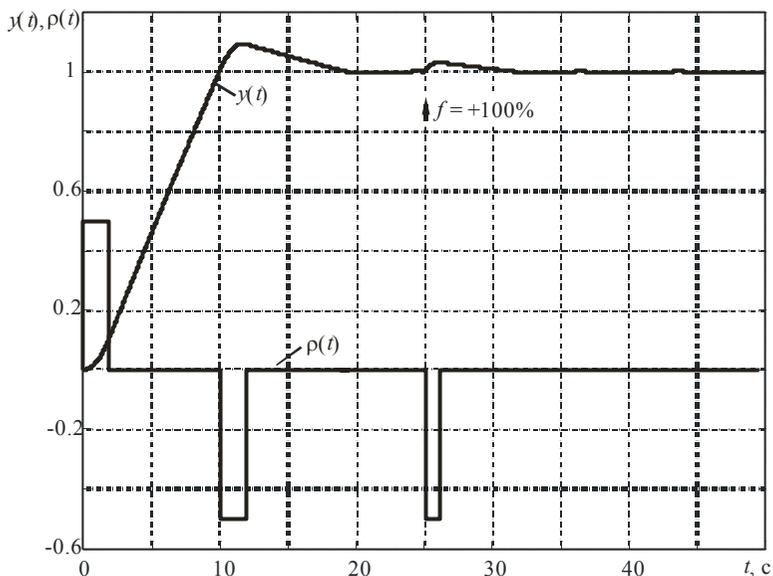


Рис. 4.2. Переходный процесс в системе автоматического регулирования с интегральным регулятором с перестраиваемой структурой по каналу задающего воздействия

При оптимальной настройке на максимальное возмущение рассматриваемый регулятор точно компенсирует возмущение за один непрерывный ход исполнительного механизма; для всех возмущений меньше максимального – за два, три хода исполнительного механизма.

#### **4.4. Интегральный дискретный регулятор с переменной структурой**

Управление некоторыми непрерывными технологическими процессами с применением интегральных дискретных регуляторов с постоянным циклом затруднительно, поскольку, как известно [14], в них периодически оценивается сигнал ошибки регулирования и на основании этой информации формируется регулирующее воздействие с целью компенсации возмущений. Это воздействие формируется в промежуток между двумя импульсами без учета предыстории. Однако возмущения, возникающие в технологических процессах, носят зачастую вероятностный характер и могут быть заданы лишь статистически. Кроме того, на сигнал ошибки регулирования может

быть наложена помеха, существенно искажающая информацию о процессе. В итоге это может привести к резкому ухудшению качества процесса регулирования, а в отдельных случаях и к потере устойчивости системы. Следовательно, в этих случаях целесообразно использовать для управления информацию за более длительное время.

В синтезируемом регуляторе использован периодический режим работы с постоянным циклом, начинающимся после появления возмущения. В каждом цикле контур регулирования замыкается на некоторое, достаточно короткое время. При формировании регулирующего воздействия, в отличие от обычного дискретного интегрального регулятора, учитывается предыстория процесса, т.е. его характер в то время, когда система разомкнута. В этот период происходит оценка изменений сигнала ошибки относительно нулевого уровня.

Если в то время, когда система разомкнута, сигнал ошибки пересечет нулевое значение хотя бы один раз, то очередной управляющий импульс не поступит на вход интегрирующего звена, хотя в момент замыкания контура регулирования этот импульс не равен нулю. Если за время размыкания системы сигнал ошибки не пересечет нулевое значение, то регулятор работает как обычный дискретный интегральный регулятор.

Интегральный дискретный регулятор с перестраиваемой структурой (структурная схема приведена на рис. 4.3) состоит из узла памяти, вырабатывающего вспомогательные координаты  $\eta$  и  $\vartheta$ , и логического устройства, которое в зависимости от сочетания знаков вспомогательных координат формирует логический закон управления:

$$\varepsilon^* = \varepsilon \cdot U,$$

$$U = F \& H,$$

где  $H$  – значение импульса окончания счета длительностью  $t = T_{\text{зам}}$ ;

$$F = (M_{\eta} \bar{M}_{\vartheta} \vee \bar{M}_{\eta} M_{\vartheta}) \& R.$$

Здесь  $R$  – величина, характеризующая окончание цикла

$$M_{\eta} = (\eta \vee M_{\eta}) \& R; \quad M_{\vartheta} = (\vartheta \vee M_{\vartheta}) \& R,$$

где  $\eta = \text{sgn}(\text{sgn}(E + \varepsilon) + 1)$ ;  $\bar{\vartheta} = \text{sgn}(\text{sgn}(\varepsilon + E) + 1)$ .

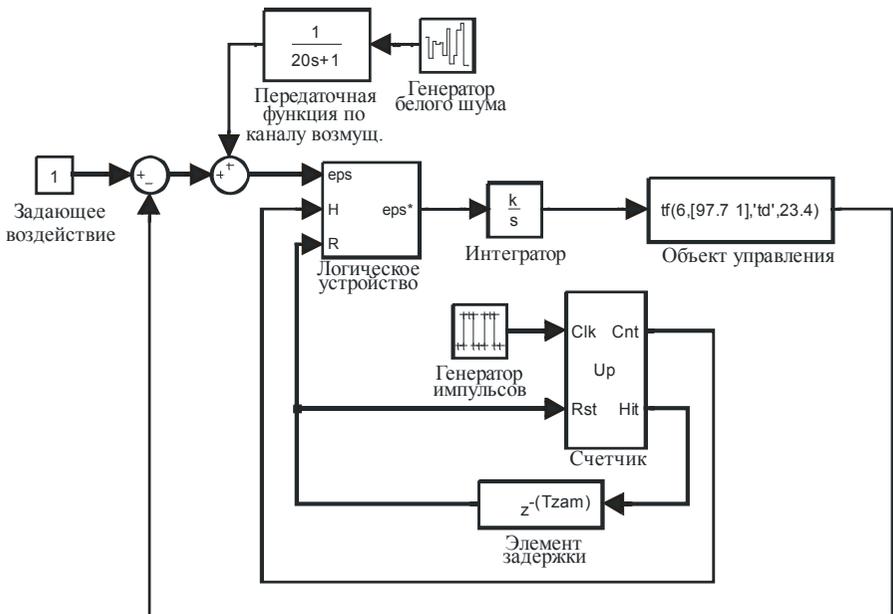


Рис. 4.3. Структурная схема системы с дискретным интегральным регулятором с переменной структурой

При появлении возмущения, когда величина сигнала ошибки превышает пороговое значение  $E$ , одна из вспомогательных координат  $\eta$  или  $\vartheta$  узла памяти воздействует на логическое устройство, которое по истечении некоторого наперед заданного времени  $T_{ц}$  замыкает канал регулирования на время  $t = T_{зам}$ . Канал регулирования оказывается замкнутым, и сигнал ошибки  $\epsilon(t)$  воздействует на интегрирующее звено, компенсируя возмущающее воздействие.

Если за время  $t = T_{ц}$  сигнал ошибки  $\epsilon(t)$  изменит знак, то появление второй вспомогательной координаты приведет к тому, что в момент окончания цикла канал регулирования по-прежнему будет разомкнут и сигнал ошибки не поступит на интегрирующее звено. Иными словами, это приведет к сбросу счетчика времени цикла. Циклы будут повторяться до тех пор, пока величина сигнала ошибки не станет меньше порогового значения  $E$ .

На рис. 4.4 приведен переходный процесс рассматриваемой системы  $y(t)$  по каналу задающего воздействия при действии на ошибку регулирования не поддающихся измерению случайных возмущающих воздействий.

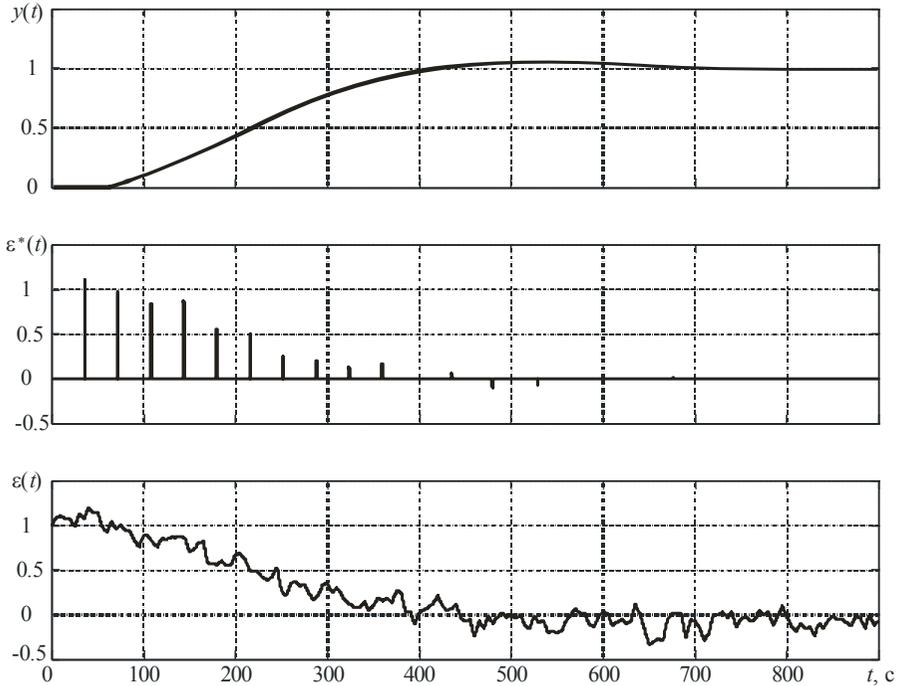


Рис. 4.4. Переходный процесс по каналу задающего воздействия

Применение рассматриваемого регулятора целесообразно, когда на сигнал ошибки налагается не поддающаяся измерению помеха, существенно искажающая информацию о процессе.

## 5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проектирование и анализ современных систем автоматического управления в настоящее время немислимы без применения средств вычислительной техники. Существует большое количество пакетов прикладных программ (ППП), которые могут облегчить задачи синтеза и анализа таких систем. К наиболее известным зарубежным можно отнести MATLAB, Mathcad, Maple, из отечественных пакетов следует выделить MGTU разработки Московского государственного технического университета.

В процессе выполнения курсовой работы в помощь разработчику могут привлекаться любые понравившейся ему ППП. По мнению же автора, наиболее мощным и универсальным инструментом, для поставленной задачи, является среда MATLAB с ее пакетами расширения, основные аспекты которой рассмотрим ниже.

### 5.1. Задание модели

Для синтеза и анализа систем автоматического регулирования в среде MATLAB существует пакет расширения под названием Control System Toolbox.

Как уже упоминалось в предыдущих главах, математическое описание элементов систем автоматического управления может быть представлено в виде системы дифференциальных уравнений (ss-форма пространства состояний)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u, \end{cases}$$

в виде передаточной функции (tf-форма)

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, \quad m \leq n,$$

в виде нулей, полюсов и коэффициента усиления (zpk-форма)

$$W(p) = K \frac{(p - Z_1)(p - Z_2) \dots (p - Z_m)}{(p - P_1)(p - P_2) \dots (p - P_n)}, \quad m \leq n.$$

В западной литературе и соответственно в ППП, созданных зарубежными разработчиками, для обозначения комплексной переменной принято использовать обозначение  $s$ , в отечественных источниках принято обозначение  $p$ . При необходимости Control System Toolbox позволяет заменить установленное по умолчанию обозначение комплексной переменной  $s$  на привычное пользователю обозначение, что будет показано далее.

В ППП Control System Toolbox существует класс объектов – lti-объекты – линейные системы с постоянными параметрами. В зависимости от выбора формы представления модели линейная система может быть задана либо парой многочленов числитель/знаменатель передаточной функции, либо тройкой {нули, плюсы, обобщенный коэффициент передачи}, либо четверкой  $\{A, B, C, D\}$  для моделей в пространстве состояний [15].

Рассматриваемый ППП обеспечивает создание структур данных для каждой из моделей, называемых соответственно tf-, zpk- или ss- подклассами класса lti-объектов. Эти три подкласса могут быть описаны одним типом данных – массивом ячеек, что позволяет манипулировать линейными системами как единым объектом, а не наборами данных в виде векторов или матриц.

Например, команда  $W = tf([5 \ 1], [200 \ 20 \ 1])$  создает объект  $W$  подкласса tf с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{5p + 1}{200p^2 + 20p + 1},$$

который содержит коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции. Теперь можно манипулировать этой передаточной функцией как стандартным объектом lti-класса, например строить частотные, динамические и другие характеристики.

**Тf-объект.** Одномерная передаточная функция  $h(p) = \text{num}(p)/\text{den}(p)$  задается многочленом числителя num и многочленом знаменателя den. В системе MATLAB многочлены представляются как векторы строки, составленные из коэффициентов многочлена в порядке убывания степеней

переменной. Например, вектор [8 5 1] соответствует многочлену  $8p^2 + 5p + 1$ , а вектор [8 0 5 1] –  $8p^3 + 0p^2 + 5p + 1$  или  $8p^3 + 5p + 1$ . Если заданы векторы num и den, соответствующие многочленам числителя и знаменателя, то функция  $w = \text{tf}(\text{num}, \text{den})$  создает lti-модель одномерной системы в виде передаточной функции  $W(p) = n(p)/d(p)$ . Переменная w является объектом подкласса tf, содержащим данные о числителе и знаменателе передаточной функции.

П р и м е р.

Функция

```
>> w = tf([1 0], [12 2 1])
```

формирует передаточную функцию  $p/(12p^2 + 2p + 1)$  в следующем виде:

Transfer function:

s

-----

12 s^2 + 2 s + 1

Для использования при расчетах в качестве комплексной переменной обозначения  $p$  вместо  $s$  следует исходную функцию привести к виду

```
>>w = tf([1 0], [12 2 1], 'variable', 'p')
```

формирующему следующий результат:

Transfer function:

p

-----

12 p^2 + 2 p + 1

В случае, когда в математическое описание системы автоматического управления входит звено запаздывания, модель в tf-форме можно записать следующим образом:

```
>> w = tf([1 0], [12 2 1], 'Td', 5)
```

Transfer function:

s

exp(-5\*s) \* -----  
12 s^2 + 2 s + 1

Здесь переменная Td обозначат величину запаздывания, выраженную в секундах и равную 5.

**Zpk-объект.** Модели одномерных систем подкласса zpk задаются выражением

$$W(p) = K \frac{(p - Z_1)(p - Z_2) \dots (p - Z_m)}{(p - P_1)(p - P_2) \dots (p - P_n)}, \quad m \leq n,$$

где  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  – нули системы;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – полюсы системы;  $K$  – обобщенный коэффициент передачи, связанный с коэффициентом передачи  $k$  соотношением

$$k = K \frac{(-1)^m \prod_{i=1}^m Z_i}{(-1)^n \prod_{i=1}^n P_i}.$$

Эта модель тесно связана с формой представления lti-объекта в виде передаточной функции: нули – это корни многочлена числителя, полюсы – корни многочлена знаменателя.

Функция, предназначенная для формирования таких моделей, имеет вид  $w = \text{zpk}(z, p, K)$ , где  $z$  и  $p$  – векторы из нулей и полюсов, а  $K$  – обобщенный коэффициент передачи. Она создает объект  $w$  подкласса zpk.

**Пример.**

Оператор:

```
>> w = zpk(0, [2 1-i 1+i], -5)
```

формирует zpk-объект

```
Zero/pole/gain:
```

```
-5 s
```

```
-----
```

```
(s-2) (s^2 - 2s + 2)
```

**Ss-объект.** Для описания динамических систем в пространстве состояний применяются модели подкласса ss, которые основаны на линейных дифференциальных или разностных уравнениях.

Модель непрерывной системы в подклассе ss имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u, \end{cases}$$

где  $x$  – вектор состояния;  $u$  – вектор входа;  $y$  – вектор выхода. Такие модели возникают, когда для описания процессов, протекающих в элементах или системах автоматического управления, применяются законы физики, механики и другие естественные науки. Для формирования моделей в подклассе `ss` предназначена функция `sys = ss(A,B,C,D)`. В результате получаем описание `ss`-объекта в виде четверки матриц  $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}\}$ , которые должны иметь согласованные размеры. Если  $n$  – число переменных состояния,  $p$  – число входов и  $m$  – число выходов, то четверка матриц должна иметь следующие размеры:  $\{\mathbf{A}_{n \times n}, \mathbf{B}_{n \times p}, \mathbf{C}_{m \times n}, \mathbf{D}_{m \times p}\}$ . Для моделей с нулевой матрицей  $\mathbf{D}$  можно использовать приравнение  $\mathbf{D} = 0$  как краткую форму записи нулевой матрицы соответствующих размеров.

**П р и м е р.**

Рассмотрим модель электрического двигателя, которой соответствует дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\frac{d\theta}{dt} + 5\theta = 3I,$$

где  $\theta$  – угол поворота ротора;  $I$  – ток в управляющей обмотке двигателя.

Этому дифференциальному уравнению можно поставить в соответствие следующую систему уравнений, используя в качестве переменных состояния угол и угловую скорость вращения ротора:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}x, \end{cases}$$

где

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ d\theta/dt \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -5 & -2 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}; c = [0 \quad 1].$$

Эта система записана в явной форме Коши и может быть сформирована с использованием следующего обращения к функции `ss`:

`>> sys = ss([0 1;-5 -2], [0;3], [0 1], 0)`

```

a =
      x1 x2
x1  0  1
x2 -5 -2

b =
      u1
x1  0
x2  3

c =
      x1 x2
y1  0  1

d =
      u1
y1  0

```

Continuous-time model.

**Дискретные lti-объекты.** Для того чтобы сформировать дискретную модель с заданным периодом дискретности, следует к входным аргументам функции `tf`, `zpk` или `ss` добавить обращение к свойству lti-объекта под названием `Ts` – период дискретности – и установить его равным значению `Ts_value`, измеряемому в секундах:

```

sys = tf(num,den,'Ts',Ts_value);
sys = zpk(z,p,k,'Ts',Ts_value);
sys = ss(a,b,c,d,'Ts',Ts_value);

```

## 5.2. Свойства lti-объектов

В предыдущем разделе были упомянуты некоторые свойства lti-объектов, такие, как величина запаздывания и период дискретности. В данном разделе приведем полный список свойств lti-объектов, которые разделяются на родовые и специальные. Родовые свойства (табл. 5.1) являются общими для всех подклассов объектов класса `lti`, а специальные свойства относятся только к одному подклассу модели.

**Родовые свойства lti-объектов**

Свойство	Описание	Тип данных
InputName	Название входов	Массив ячеек
Notes	Информация об истории модели	Текст
OutputName	Название выходов	Массив ячеек
Ts	Период дискретности	Скаляр
Td	Запаздывание на входе	Вектор
Userdata	Дополнительные данные	Произвольные

Свойства InputName и OutputName предназначены для того, чтобы описать назначение входов и выходов системы; для их представления используются массивы ячеек, содержащие строки символов вида: 'мощность', {'скорость', 'угол'} и т.п.

Свойство Notes предназначено для указания описательной информации об истории модели, времени ее создания и т.п. По умолчанию это поле является пустым.

Свойство объекта Ts хранит информацию о периоде дискретности модели, измеряемом в секундах; значения 0 и -1 используются соответственно для непрерывных и дискретных моделей с неспецифицированным периодом дискретности.

Свойство запаздывания на входе Td доступно только для непрерывных систем, его представление – вектор запаздывания для каждого входного канала, измеренный в секундах; по умолчанию используется нулевое значение (отсутствие запаздывания).

Свойство UserData может содержать числовые данные о модели, описываемые произвольными типами данных. По умолчанию это поле является пустым.

Специальные свойства lti-объектов приведены в табл. 5.2 – 5.4

**Специальные свойства объектов подкласса tf**

Свойство	Описание	Тип данных
1	2	3
Nm	Числитель(и) передаточной функции	Вектор-строка для одномерной, массив ячеек для многомерной передаточной функции

1	2	3
Den	Знаменатель(и) передаточной функции	Вектор-строка для одномерной, массив ячеек для многомерной передаточной функции
Variable	Разрешенный набор символов 's', 'p', 'z', 'q' или 'z <sup>-1</sup> ' для обозначения переменной передаточной функции	Символьная переменная

Таблица 5.3

**Специальные свойства объектов подкласса zpk**

Свойство	Описание	Тип данных
K	Обобщенный(е) коэффициент(ы) усиления	Скаляр для одномерной, двумерный массив для многомерной системы
Z	Нули передаточной функции	Вектор-строка для одномерной, массив ячеек для многомерной системы
P	Полюсы передаточной функции	Вектор-строка для одномерной, массив ячеек для многомерной системы
Variable	Разрешенный набор символов 's', 'p', 'z', 'q' или 'z <sup>-1</sup> ' для обозначения переменной передаточной функции	Символьная переменная

Таблица 5.4

**Специальные свойства объектов подкласса ss**

Свойство	Описание	Тип данных
A	Матрица состояний	
B	Матрица вход-состояние	
C	Матрица вход-состояние-выход	Двумерная матрица
D	Матрица вход-выход	
E	Матрица при производных	
StateName	Название переменных состояний	Массив ячеек

Свойство `variable` для объектов подклассов `tf` и `zpk` задает способ отображения переменной при выводе передаточных функций на экран. По

умолчанию такими переменным являются 's' (переменная преобразования Лапласа) для непрерывных систем и 'z' (переменная Z-преобразования) для дискретных систем. Альтернативными значениями переменной могут быть 'p' для 's' и 'q' или 'z^-1' для 'z'.

Свойство `StateName` позволяет присвоить имена переменным состояниям.

### 5.3. Анализ моделей lti-объектов

В данном разделе приведем список функций (табл. 5.5 – 5.8), позволяющих выполнять анализ динамических свойств lti-объектов.

Т а б л и ц а 5.5

**Функции для вычисления полюсов и нулей**

Название	Описание
<code>ploc, eig</code>	Вычислить полюсы lti-модели
<code>tzero</code>	Вычислить нули lti-модели
<code>damp</code>	Вычислить собственную частоту и коэффициент демпфирования
<code>dcgain</code>	Вычислить коэффициент передачи lti-модели
<code>esort</code>	Отсортировать полюсы и нули непрерывной lti-модели в порядке убывания их действительной части
<code>dsort</code>	Отсортировать полюсы и нули дискретной lti-модели в порядке убывания их модулей
<code>pzmap</code>	Отобразить полюсы и нули lti-модели на комплексную плоскость
<code>sgrid</code>	Нанести сетку постоянных линий коэффициента демпфирования и частоты на плоскости $s$
<code>zgrid</code>	Нанести сетку постоянных линий коэффициента демпфирования и частоты на плоскости $z$

Т а б л и ц а 5.6

**Функции для вычисления и построения частотных характеристик**

Название	Описание
1	2
<code>bode</code>	Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики (диаграммы Боде)
<code>evalfr</code>	Вычисление частотной характеристики на заданной частоте
<code>freqresp</code>	Вычисление частотной характеристики в заданном диапазоне частот

1	2
margin	Вычисление запасов устойчивости по фазе и модулю
norm	Вычисление максимального значения модуля частотной характеристики и соответствующей ему частоты
nichols	Частотный годограф Никольса
ngrid	Построение сетки координат для годографа Никольса
nyquist	Частотный годограф Найквиста
sigma	Частотные характеристики сингулярных значений передаточной функции

Т а б л и ц а 5.7

**Функции для анализа моделей в пространстве состояний**

Название	Описание
ssbal	Масштабирование с помощью диагональной матрицы
ss2ss	Линейное преобразование переменных состояний
augstate	Добавление вектора состояния к вектору выхода
canon	Канонические формы моделей в пространстве состояний
ctrb	Матрица управляемости
ctrbf	Матрица управляемости в ступенчатой форме
obsv	Матрица наблюдаемости
obsvf	Матрица наблюдаемости в ступенчатой форме
gram	Грамианы управляемости и наблюдаемости
balreal	Сбалансированная реализация
minimal	Минимальная реализация
modred	Понижение порядка модели
ord2	Создание модели второго порядка
rss, model	Создание моделей устойчивых непрерывных систем со случайными параметрами
drss, dmodel	Создание моделей устойчивых дискретных систем со случайными параметрами

Т а б л и ц а 5.8

**Функции для построения переходных процессов**

Название	Описание
1	2
initial	Реакция на ненулевые начальные условия
step	Переходная функция

1	2
<code>impulse</code>	Импульсная переходная функция
<code>gensig</code>	Генератор входного сигнала
<code>lsim</code>	Моделирование процессов при произвольных входных сигналах
<code>covar</code>	Вычисление ковариационной матрицы выходов

Синтаксис написания любой из вышеперечисленных функций можно посмотреть с помощью команды `help`, например

```
>> help step
```

выдает на экран подробную информацию о функции построения переходного процесса.

Кроме всего, дополнительную информацию на русском языке можно найти в сети Internet на сайте консультационного центра MATLAB, доступного, на момент написания пособия, по адресу <http://matlab.exponenta.ru>.

#### **5.4. Использование пакета Simulink**

В состав системы инженерных и научных расчетов MATLAB входит мощнейшая система моделирования динамических и событийно управляемых систем – Simulink. Система Simulink позволяет моделировать сложные системы, обеспечивая автоматизацию всех этапов разработки на основе численных методов решения математических задач, использования графического интерфейса пользователя и современных персональных компьютеров. Систему Simulink можно рассматривать как совокупность методов и средств автоматизации процесса разработки современных систем управления.

Запуск Simulink осуществляется вводом одноименной команды `simulink` в командной строке системы MATLAB. Можно также указателем мыши выбрать пиктограмму Simulink (8-я слева) на панели инструментов системы MATLAB. В результате откроется окно Simulink Library Browser (Браузер библиотеки Simulink), которое показано на рис. 5.1. Создание новой модели в системе Simulink осуществляется выбором пиктограммы `Create a new model` (1-я слева) на панели инструментов данного окна. Появившееся пустое окно имеет заглавие по умолчанию `untitled`. В этом окне строится модель системы в виде структурной схемы.

**Внимание!!!** Перед началом дальнейшей работы желательно установить параметры моделирования. Вызов свойств моделирования можно осуществить тремя способами. Первый – на панели команд в открывшемся окне выбрать раздел Simulation/Simulation parameters...; второй – поместить указатель мыши в пустое поле открывшегося окна, нажать правую кнопку мыши и в появившемся внизпадающем меню выбрать пункт «Simulation parameters...»; третий – нажать сочетание клавиш «Ctrl + E». В появившемся диалоговом окне (рис. 5.2) по умолчанию открыта первая вкладка «Solver» (Решатель), открытая вкладка условно разделена на три области, в которых необходимо выполнить следующие установки. Область «Simulation time» (Время моделирования) – установить требуемое начальное время моделирования (Start time) и время остановки моделирования (Stop time). Область «Solver option» (Опции решения) – выбрать в поле «тип» (Type) фиксированный шаг моделирования (Fixed step), в соседнем левом меню выбрать метод решения – «ode5 (Dormand-Prince)», в поле «величина фиксированного шага» (Fixed step size) указать требуемый шаг моделирования. Затем нажать кнопку «ОК» и приступить к дальнейшему моделированию.

Построение структурной схемы осуществляется путем переноса готовых блоков из библиотеки Simulink в новый документ и соединением их комбинационными связями. Библиотека Simulink состоит из нескольких разделов, в которых расположены блоки по функциональному назначению. Так в Simulink v.5.0 основная библиотека подразделена на «Continuous» (Непрерывные), «Discontinuities» (Нелинейности разрывного типа), «Discrete» (Дискретные), «Look-Up Tables» (Обращение к массивам), «Math Operations» (Математические операции), «Model Verification» (Проверяющие модели), «Model-Wide Utilities» (Инструментарий расширения свойств модели), «Ports & Subsystems» (Порты и подсистемы), «Signal Attributes» (Свойства сигналов), «Signal Routing» (Переключатели), «Sinks» (Регистраторы), «Sources» (Источники), «User-Defined Functions» (Функции пользователя).

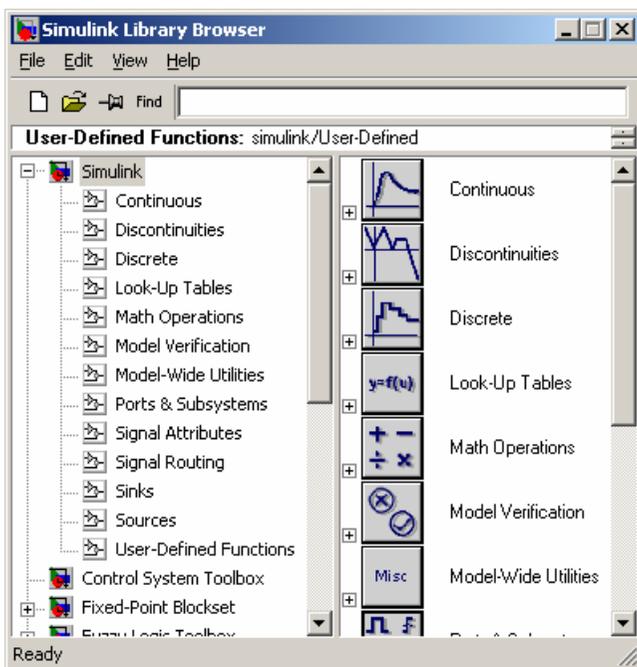


Рис. 5.1. Браузер библиотеки Simulink

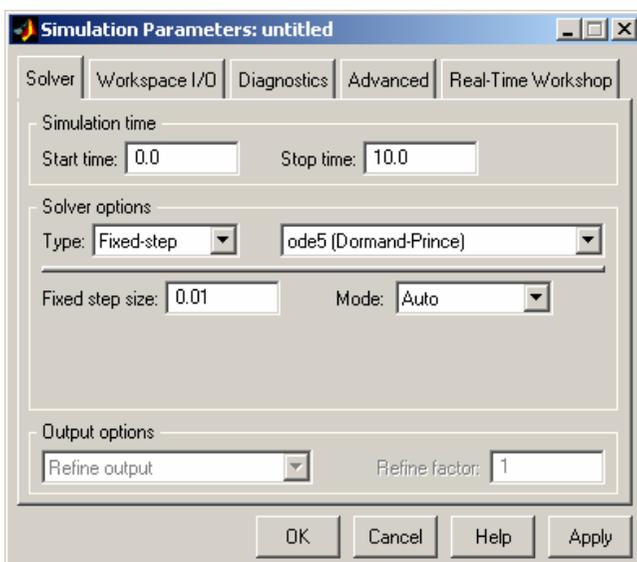


Рис. 5.2. Диалоговое окно установки свойств моделирования

### Пример.

Построим переходный процесс интегрирующего звена. Откроем раздел «Непрерывные» и найдем в нем блок «Integrator». Наведя на него указатель мыши, нажмем левую клавишу мыши и, удерживая ее, перенесем блок в пустое поле нашей новой модели. Из раздела «Источники» аналогичным образом перенесем блок «Constant», а из раздела «Регистраторы» – блок «Scope». Соединив блоки между собой, получаем структурную схему, представленную на рис 5.3. Теперь необходимо запустить процесс моделирования. Осуществить это можно тремя способами: первый – на командном меню выбрать Simulation/Start; второй – нажать пиктограмму «Start Simulation» на панели инструментов (10-я слева); третий – нажать сочетание клавиш «Ctrl+T». После остановки процесса моделирования необходимо двойным щелчком клавиши мыши нажать на блок «Scope» в построенной модели. В результате откроется окно с графиком переходного процесса интегрирующего звена.

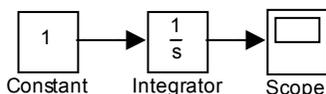


Рис. 5.3. Структурная схема модели

В данном разделе мы не будем описывать назначение и работу с каждым блоком из библиотеки Simulink. Данному вопросу посвящено большое количество работ [6, 7], в них можно найти очень подробное описание каждого блока.

Кроме библиотеки Simulink в Simulink Library Browser входит ряд специализированных библиотек, среди которых есть уже знакомая нам по предыдущему разделу – Control System Toolbox. В ее состав входит блок «LTI System», имеющий два поля настройки «LTI system variable» и «Initial state (state-space only)». В первом задается функция, описывающая lti-объект, по умолчанию в поле указана функция  $tf(1,[1 \ 1])$ . Во втором указываются начальные условия, по умолчанию оно имеет значение пустой матрицы [], что означает нулевые начальные условия. Кроме того, по умолчанию второе поле недоступно для редактирования и становится активным только в том случае, если описание объекта выполнено с помощью пространства состояний, т.е. с использованием модели подкласса ss.

## 5.5. Использование S-функций

Simulink-функции (S-функции, S-functions) являются описанием блока на одном из языков программирования: MATLAB, C, C++, Ada или Fortran. Библиотека Simulink содержит достаточно обширное количество готовых блоков, однако в практике моделирования встречаются ситуации, когда нужного блока нет либо структурное моделирование делает модель слишком сложной (процесс отладки такой модели может отнимать большое количество времени и нервов). В этом случае необходимо использовать технологию S-функций для создания нужного блока. С помощью языков программирования пользователь может создать описание сколь угодно сложного блока и подключить его к Simulink-модели, при этом с точки зрения взаимодействия пользователя с моделью, блок на основе S-функции ничем не отличается от стандартного библиотечного блока Simulink. Создаваемые блоки могут быть непрерывными, дискретными или гибридными.

Чаще всего S-функции используются при создании новых библиотечных блоков, обеспечивающих взаимодействие Simulink с аппаратными средствами компьютера, при создании блоков на основе математических уравнений, блоков, реализующих анимационные возможности MATLAB, а также при подключении к модели Simulink существующего программного кода языков высокого уровня.

**Блок S-функции.** S-функция включается в модель системы Simulink с помощью блока S-Function, который находится в разделе «User-Defined Functions». На рис. 5.4 изображена структурная схема, содержащая S-функцию.

Диалоговое окно Block Parameters блока S-Function содержит два текстовых поля: S-function name, в котором задается имя файла S-функции без расширения (данное поле должно быть заполненным); S-function parameters, в котором задаются входные параметры S-функции. Если S-функция требует задания входных параметров, то они вводятся в виде списка, элементы которого разделены запятыми, скобки не используются.

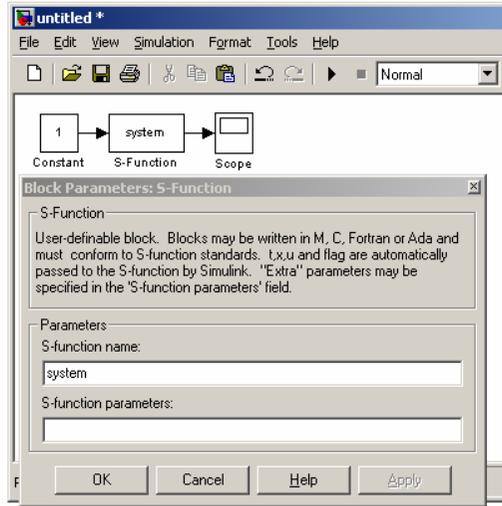


Рис. 5.4. Структурная схема модели

**Обзор S-функции.** S-функция представляет собой блок системы Simulink, имеющий вектор входных переменных (вектор входа)  $u$ , вектор выходных переменных (вектор выхода)  $y$  и вектор переменных состояния  $x$ . В общем случае, система, описываемая S-функцией, имеет и непрерывную и дискретную части, соответственно вектор состояния  $x$  содержит компоненты вектора переменных состояния непрерывной части системы  $x_c$  и компоненты вектора переменных состояния дискретной части  $x_d$ . Каждая S-функция должна включать в себя код, позволяющий задавать начальные значения всех элементов вектора переменных состояния и определять размеры вектора входа, вектора выхода, а также число компонентов вектора переменных состояния непрерывной и дискретной частей системы. Таким образом, каждая S-функция должна рассчитывать вектор выхода как функцию

$$y = g(x, u, t, p), \quad (5.1)$$

вычислять переменные состояния дискретной части (если такие имеются) с помощью разностного уравнения

$$x_d(k+1) = f_d(x, u, t, p) \quad (5.2)$$

и рассчитывать производные переменных состояния непрерывной части (если такие имеются) с помощью следующего выражения:

$$x'_c = f_c(x, u, t, p). \quad (5.3)$$

Здесь  $t$  обозначает текущее время моделирования, а  $p$  – необязательная строка параметров блока S-функции, определенных в текстовом поле S-function parameters диалогового окна данного блока. Если период квантования S-функции не является постоянной величиной, то каждый последующий момент времени квантования дискретной части должен вычисляться.

Размер каждого из векторов является произвольным и, в частности, может быть равен нулю. Например, S-функция может иметь вектор входных переменных и вектор выходных переменных, но не иметь переменных состояния (аналогично блоку Gain или ряду блоков из библиотеки блоков Discontinuities). S-функция может быть использована для создания пользовательского источника сигналов или средства регистрации, а также блока, включающего только переменные состояния непрерывной части (аналогично блоку Integrator) или только переменные состояния дискретной части (аналогично блоку Unit Delay).

В уравнениях (5.1) – (5.3) в функциях используется весь вектор переменных состояния  $x$ . Если данный вектор имеет  $n$  компонентов переменных состояния непрерывной части и  $m$  компонентов переменных состояния дискретной части, то первые  $n$  элементов вектора переменных состояния  $x$  являются текущими значениями компонентов вектора  $x_c$  и оставшиеся  $m$  – текущими значениями компонентов вектора  $x_d$ .

Система Simulink вызывает S-функцию для вычисления правых частей уравнений (5.1) и (5.3) на каждом шаге моделирования. Вычисления с помощью уравнения (5.2) выполняются на каждом шаге квантования. Если в системе имеется несколько значений периодов квантования, то S-функция должна включать в себя логические операции для определения компонентов вектора  $x_d$ , которые необходимо рассчитать.

Вектор состояния S-функции включает только те компоненты, которые определены внутри S-функции, а не все переменные состояния моделируемой системы. Так, например, если S-функция описывает элемент интегратор со скалярной входной переменной, ее вектор состояния будет включать только одну переменную состояния. Если же она описывает передаточную функцию системы третьего порядка, вектор состояния будет иметь три компонента.

**Создание S-функций на основе M-файлов.** S-функция на основе M-файлов – это M-функция, имеющая список входных и выходных аргументов. Первая строка данного M-файла имеет вид

```
function[sys, x0, str, ts] = sfunc_name(t, x, u, flag,p1,p2, ...,pn),
```

где `sfunc_name` – имя S-функции, которое должно совпадать с именем файла без расширения. Например, если имя файла `my_sfunc.m`, то имя S-функции будет `my_sfunc`. Входные аргументы определены в табл. 5.9, выходные – в табл. 5.11. В комплект поставки системы MATLAB входит шаблон M-файла S-функции, который находится в файле `sfuntmpl.m`, в директории `MATLAB\toolbox\simulink\blocks`.

Т а б л и ц а 5.9

### Входные аргументы S-функции

Аргумент	Определение
<code>t</code>	Текущее значение времени моделирования
<code>x</code>	Текущее значение вектора состояния. Если присутствуют $n$ переменных состояния непрерывной части и $m$ переменных состояния дискретной части, то первые $n$ компонентов вектора <code>x</code> – это переменные состояния непрерывной части, а оставшиеся $m$ – это переменные состояния дискретной части
<code>u</code>	Текущее значение вектора входа
<code>flag</code>	Параметр <code>flag</code> устанавливается системой Simulink каждый раз, когда вызывается S-функция, которая проверяет значение параметра <code>flag</code> и производит действия, указанные в табл. 5.10
<code>p1,p2, ...,pn</code>	Список необязательных параметров. Число параметров должно быть тем же, что и число параметров в текстовом поле S-function parameters

Т а б л и ц а 5.10

### Значение параметра flag S-функции

Значение параметра <code>flag</code>	Описание
1	2
0	Формирование структуры <code>sizes</code> и запись значений полей данной структуры в вектор <code>sys</code> . Задание вектора <code>x0</code> (начальное условие) и матрицы <code>ts</code> (матрица периодов квантования и времен смещений). Определение пустой матрицы <code>str = []</code>

1	2
1	Вычисление значений производных переменных состояния непрерывной части. Запись в вектор <i>sys</i> вектора производных непрерывных компонентов вектора состояния S-функции. Вектор <i>sys</i> – единственный выходной аргумент
2	Вычисление переменных состояния дискретной части системы. Запись в вектор <i>sys</i> вектора состояния дискретной части на следующем шаге квантования. При данном значении параметра <i>flag</i> в том случае, если в системе имеются различные периоды квантования, производится вычисление всех компонентов вектора состояния дискретной части, в том числе и тех, которые не меняются. Вектор <i>sys</i> – единственный выходной аргумент
3	Вычисление вектора выхода. Запись в вектор <i>sys</i> вектора выхода. Вектор <i>sys</i> – единственный выходной аргумент
4	Вычисление следующего момента времени квантования. Полученное значение записывается в вектор <i>sys</i> . Вектор <i>sys</i> – единственный выходной аргумент
9	Передача управления функции завершения моделирования. При этом выходные аргументы отсутствуют

Т а б л и ц а 5.11

**Выходные аргументы S-функции**

Аргумент	Описание
<i>sys</i>	Многоцелевой выходной аргумент. Определение значений элементов вектора <i>sys</i> зависит от значения параметра <i>flag</i>
<i>x0</i>	Начальное значение вектора состояния S-функции. Вектор <i>x0</i> включает в себя непрерывные и дискретные компоненты вектора переменных состояния. При формировании вектора <i>x0</i> требуется, чтобы значение параметра <i>flag</i> было равно 0
<i>str</i>	Выходной аргумент, зарезервированный для дальнейшего использования. Данному параметру следует присвоить значение пустого массива []. Данный аргумент требуется, только когда значение параметра <i>flag</i> равно 0
<i>ts</i>	Матрица квантования. Матрица имеет два столбца. В первом столбце задается значение периода квантования, во втором – значение времен смещения. Матрица должна иметь по крайней мере одну строку. Для задания матрицы необходимо, чтобы значение параметра <i>flag</i> было равно 0

S-функция на основе M-файла проверяет значение входного параметра `flag` и производит операции, описанные в табл. 5.10. Подход, применяемый в шаблонах системы MATLAB, состоит в использовании оператора переключения `switch-case`, который вызывает внутренние функции, основываясь на шести возможных значениях параметра `flag`. Рассмотрим операции, выполняемые S-функцией для каждого возможного значения параметра `flag`.

**Инициализация (параметр `flag = 0`).** Инициализация состоит из четырех операций.

1. Инициализируется структура `sizes`. Для установки размеров структуры используется следующее выражение:

```
sizes = simsizes;
```

Затем присваиваются значения полям структуры `sizes`. Каждому полю структуры `sizes` присваивается значение, даже если это значение равно нулю. В табл. 5.12 содержится список полей структуры `sizes`.

После определения данной структуры значения ее полей записываются в вектор `sys` посредством выражения

```
sys = simsizes(sizes);
```

2. Задаются начальные условия в виде вектора состояния  $x_0$ . Например, пусть вектор  $x_0$  состоит из двух компонентов вектора состояния непрерывной части с начальными значениями 1 и двух компонентов вектора состояния дискретной части с начальными значениями 0. Тогда начальные условия задаются выражением

```
x0 = [1, 1, 0, 0];
```

3. Задается выходной аргумент `str`:

```
str = [];
```

4. Устанавливаются периоды квантования и времена смещения в матрице `ts`. Для S-функции непрерывной системы используется выражение

```
ts = [0, 0];
```

Рассмотрим дискретную систему, в которой имеются два периода квантования. Величина первого равна 0.8 при смещении, равном 0. Величина второго равна 0.4 при смещении, равном 0.2. В этом случае матрица квантования задается выражением

```
ts = [0.8, 0; 0.4, 0.2];
```

Если период квантования считывается из блока, связанного с входом блока S-функции, то периоду квантования присваивается значение, равное  $-1$ .

Если период квантования является переменной величиной, то период квантования в матрице *ts* устанавливается равным  $-2$ . В этом случае S-функция вызывается с параметром *flag*, равным 4, для вычисления следующего значения момента времени квантования.

Т а б л и ц а 5.12

### Структура *sizes*

Поле	Описание
<i>sizes.NumcontStates</i>	Размерность вектора состояния непрерывной части. Например, если размерность вектора состояния непрерывной части равна 2, полагаем <i>sizes.NumcontStates</i> = 2
<i>sizes.NumDiscStates</i>	Размерность вектора состояния дискретной части
<i>sizes.NumOutputs</i>	Размерность вектора выхода
<i>sizes.NumInputs</i>	Размерность вектора входа
<i>sizes.DirFeedthrough</i>	Переменная полагается равной 1, если имеется прямая связь между входом и выходом; иначе $-0$ . Наличие прямой связи означает, что в канале между каким-либо входом и каким-либо выходом отсутствуют динамические звенья. Система Simulink использует значение этого параметра, чтобы определить, имеются ли в модели алгебраические контуры
<i>sizes.NumSampleTimes</i>	Число строк матрицы <i>ts</i> (табл. 5.11). Минимальное значение равно 1 даже в случае S-функции непрерывной модели

**Вычисление производных переменных состояния непрерывной части системы (параметр *flag* = 1).** Если параметр *flag* равен 1, в вектор *sys* записывается вектор производных переменных состояния непрерывной части. Следует отметить, что если существуют еще и переменные состояния дискретной части, то размерность вектора *sys* будет отлична от размерности вектора *x*, поскольку вектор *x* включает как непрерывные, так и дискретные компоненты вектора состояния. Если модель, описываемая S-функцией, не содержит непрерывных компонентов вектора состояния, S-функция не будет вызываться с параметром *flag*, равным 1.

Пример.

Пусть S-функция описывает нелинейную систему, заданную в виде

$$\begin{cases} x'_1 = x_2, \\ x'_2 = x_1 - 5x_2^3 + u_1. \end{cases}$$

Для формирования вектора `sys` используются следующие выражения:

$$\text{sys}(1) = x(2);$$

$$\text{sys}(2) = x(1) - 5*x(2)^3 + u(1);$$

**Вычисление переменных состояния дискретной части системы (параметр `flag = 2`).** Если параметр `flag` равен 2, в вектор `sys` записывается вычисленный вектор переменных состояния дискретной части. В случае многотактовых систем, включая дискретно-непрерывные системы с периодом квантования, равным нулю для непрерывной части системы, S-функция вычисляет только те компоненты вектора состояния дискретной части, для которых текущее время моделирования совпало с моментом времени квантования на данном шаге. Следует заметить, что всем компонентам вектора состояния дискретной части необходимо присвоить некоторое значение.

Пример.

Рассмотрим дискретную систему первого порядка:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + u_1(k).$$

При значении параметра `flag`, равном 2, для формирования вектора `sys` используется следующее выражение:

$$\text{sys} = x(1) + u(1);$$

Рассмотрим дискретную систему второго порядка с двумя периодами квантования, равными 0.3 с и 0,5 с; значение времени смещения равно 0 в обоих случаях. Разностные уравнения имеют вид

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + 0.8x_2(k), \\ x_2(k+1) = x_2(k) + u_1(k). \end{cases}$$

Следующий код производит проверку времени моделирования и вычисляет вектор `sys`, если текущее время совпало с моментом времени квантования – величиной, кратной периоду квантования на данном шаге:

$$\text{period}_1 = 0.3;$$

$$\text{offset}_1 = 0.0;$$

```

period_2 = 0.5;
offset_2 = 0.0;
sys = x;
if abs(round(t - offset_1)/period_1) - ((t - ...
...offset_1)/period_1)) < 1.0e-8
    sys(1) = sys(1) + 0.8*x(2);
end
if abs(round(t - offset_2)/period_2) - ((t - ...
...offset_2)/period_2)) < 1.0e-8
    sys(2) = sys(2) + u(1);
end

```

Следует отметить, что при проверке совпадения текущего времени моделирования с моментом времени квантования в конструкции операторов условия `if ... else` не должен использоваться оператор `else`. В противном случае, когда время моделирования кратно обоим периодам квантования, S-функция выдала бы неверный результат. Отметим, что точность данного подхода к определению момента времени квантования ограничена вычислительной погрешностью. При этом уменьшение погрешности может быть достигнуто использованием S-функций, написанных на языке C.

**Вычисление вектора выходной переменной блока (параметр `flag = 3`).** Если параметр `flag` равен 3, в вектор `sys` записывается вектор выхода S-функции (уравнение (5.1)).

*Пр и м е р.*

Пусть задан вектор выхода системы второго порядка

$$y = x_1 + 2x_2.$$

В случае, когда параметр `flag` равен 3, для формирования вектора `sys` используется следующее выражение:

```
sys = x(1) + 2*x(2);
```

**Вычисление следующего значения периода квантования (параметр `flag = 4`).** Если значение параметра `flag` равно 4, то в вектор `sys` записывается значение следующего значения периода квантования. S-функция вызывается с параметром `flag`, равным 4, только в том случае, если период квантования определен как переменная величина (на этапе инициализации S-функции период квантования в матрице `ts` задан равным `-2`).

**Завершение работы (параметр flag = 9).** Когда моделирование завершено, S-функция вызывается с параметром flag, равным 9. S-функция должна произвести все необходимые действия для завершения процесса моделирования. В этом случае в вектор sys не записывается никакого значения [7].

**Примеры S-функций на основе M-файлов.** В этом разделе приведем два примера, показывающие, как создать S-функции, описывающие непрерывную систему, а также модель, задаваемую алгебраическим уравнением. Другие примеры, входящие в комплект поставки системы Simulink, можно найти в директории MATLAB/toolbox/simulink/simdemos.

Пример.

Рассмотрим модель, описываемую алгебраическим уравнением

$$y = 2u_1 + u_2^3.$$

Из уравнения следует, что S-функция имеет два входа, один выход и не является моделью в переменных состояния. Поскольку между входом и выходом отсутствуют динамические звенья, то данная S-функция определяет прямую передачу между входом и выходом. Структурная схема модели, включающая в себя S-функцию, представлена на рис. 5.5.

В диалоговом окне блока Block Parameters: S-Function в текстовом поле S-function name содержится имя функции my\_first\_sfun. Код S-функции представлен в листинге 5.1 и хранится в файле my\_first\_sfun.m.

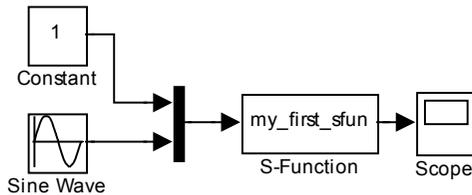


Рис. 5.5. Структурная схема модели

Листинг 5.1.

```
function[sys, x0, str, ts] = my_first_sfun(t,x,u, flag)
%S-функция реализует функцию y=2*u(1)+u(2)^3.
switch flag,
    case 0, % Инициализация.
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```

case 1, % Вычисление производных переменных состояния
        % непрерывной части системы.
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3, %Вычисление вектора выхода.
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4, %Вычисление следующего значения периода квантования.
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u) ;
case 9, .
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise, %Ошибочный вход.
        error(['опущен flag= ',num2str(flag)]);
end
%*****
%           mdlInitializeSizes                               *
%*****
function[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes()
size=simsizes;
sizes.NumContStates= 0;
sizes.NumDiscStates= 0;
sizes.NumOutputs= 1;
sizes.NumInputs= 2;
sizes.DirFeedthrough=1;
sizes.NumSampleTimes=1;
    % Необходимо, по крайней мере, один период квантования,
sys = simsizes(sizes) ;
    % Записывает в вектор sys значения полей структуры sizes.
x0 = []; % Устанавливает начальное значение для всех
        % переменных, состояний
str = []; % str всегда пустая матрица
ts = [0 0]; % Инициализирует матрицу периодов квантования.
%*****
%           mdlDerivatives                                 *
%*****
function sys = mdlDerivatives(t,x,u) ;

```

```

    % Вычисление производных переменных состояния
    % непрерывной части системы.
sys = []; % Пустой, т.к. S-функция не содержит переменных
    % состояния непрерывной части системы.
%*****
%
%                               mdlUpdate                               *
%*****
function sys = mdlUpdate (t,x,u)
    % Расчет переменных состояния дискретной части системы.
    % Если необходимо, то проверяется совпадение
    % текущего времени с моментом времени квантования.
sys = []; % Пустой, т.к. модель не содержит переменных
    % состояния дискретной части системы.
%*****
%
%                               mdlOutputs                               *
%*****
function sys = mdlOutputs (t,x,u)
    % Вычисление вектора выхода.
sys = 2*u(1) + u(2)^3;
%*****
%
%                               mdlGetTimeOfNextVarHit                   *
%*****
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit (t,x,u)
    % Возвращает следующее значение периода квантования для
    % данного блока. Результат - абсолютное время.
    % Эта функция используется, только когда
    % период квантования определен как переменная величина.
sampleTime=[];
%*****
%
%                               mdlTerminate                               *
%*****
function sys = mdlTerminate (t,x,u)
    % Завершает моделирование.
sys= [ ];

```

Пример.

Рассмотрим использование S-функции для заданной непрерывной модели. Рассмотрим ПИ-регулятор с передаточной функцией вида

$$W_{\text{пи}}(p) = k_n + \frac{1}{T_n p} = \frac{k_n T_n p + 1}{T_n p},$$

где  $k_n$  – коэффициент передачи пропорциональной составляющей;  $T_n$  – время интегрирования.

Запишем данную передаточную функцию в виде уравнения

$$T_n p \cdot Y = (k_n T_n p + 1)U,$$

где  $U$  и  $Y$  – вход и выход регулятора соответственно. Приравняв полученное уравнение к некоторой величине  $X$ :

$$(k_n T_n p + 1)^{-1} Y = (T_n p)^{-1} U = X,$$

получим систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} U = T_n p \cdot X, \\ Y = (k_n T_n p + 1)X. \end{cases}$$

Если учесть, что  $p = d/dt$ , то

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{T_n} u, \\ y = k_n T_n \frac{dx}{dt} + x, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{T_n} u, \\ y = x + k_n u. \end{cases} \quad (5.4)$$

Выходная переменная S-функции совпадает с величиной  $y$ . S-функция, реализующая полученную систему дифференциальных уравнений, представлена в листинге 5.2.

## Л и с т и н г 5.2.

```

function[sys, x0, str, ts] = my_pi_controller(t,x,u, flag, Kp, Ti)
%S-функция реализует алгоритм непрерывного ПИ- регулятора
switch flag,
    case 0, % Инициализация.
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
    case 1, % Вычисление производных переменных состояния
        % непрерывной части системы.
        sys=mdlDerivatives(t,x,u, Kp, Ti);
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3, %Вычисление вектора выхода.
        sys=mdlOutputs(t,x,u, Kp, Ti);
    case 4, %Вычисление следующего значения периода квантования.
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u) ;
    case 9, .
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise, %Ошибочный вход.
        error(['опущен flag= ',num2str(flag)]);
end
%*****
%                               mdlInitializeSizes                               *
%*****
function[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes()
size=simsizes;
sizes.NumContStates= 1;
    % Устанавливаем число непрерывных состояний.
sizes.NumDiscStates= 0;
sizes.NumOutputs= 1;
sizes.NumInputs= 1;
sizes.DirFeedthrough=1;
sizes.NumSampleTimes=1;
    % Необходимо, по крайней мере, один период квантования,
sys = simsizes(sizes) ;
    % Записывает в вектор sys значения полей структуры sizes.

```

```

x0 = [0]; % Устанавливает начальное значение для всех
          % переменных, состояний
str = []; % str всегда пустая матрица
ts = [0 0]; % Инициализирует матрицу периодов квантования.
%*****
%                               mdlDerivatives                               *
%*****
function sys = mdlDerivatives(t,x,u,Kp,Ti) ;
          % Вычисление производных переменных состояния
          % непрерывной части системы.
sys = (1/Ti)*u; % Записываем первое уравнение системы (5.4)

%*****
%                               mdlUpdate                               *
%*****
function sys = mdlUpdate (t,x,u)
          % Расчет переменных состояния дискретной части системы.
          % Если необходимо, то проверяется совпадение текущего времени
          % с моментом времени квантования.
sys = []; % Пустой, т.к. модель не содержит переменных
          % состояния дискретной части системы.

%*****
%                               mdlOutputs                               *
%*****
function sys = mdlOutputs(t,x,u,Kp,Ti)
          % Вычисление вектора выхода.
sys = x + Kp*u; Записываем второе уравнение системы (5.4)

%*****
%                               mdlGetTimeOfNextVarHit                               *
%*****
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
          % Возвращает следующее значение периода квантования для
          % данного блока. Результат - абсолютное время.
          % Эта функция используется, только когда
          % период квантования определен как переменная величина.
sampleTime=[];

```

```

%*****
%                               mdlTerminate                               *
%*****
function sys = mdlTerminate(t,x,u)
    % Завершает моделирование.
    sys= [ ];

```

Поскольку в приведенной S-функции используются дополнительные параметры  $K_r$  и  $T_i$ , то их значения необходимо указать в поле S-function parameters, блока S-function, через запятую.

## 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА

**Исходные данные.** Дана кривая разгона объекта управления (рис 6.1). В качестве устройства управления использовать регулятор с переменной структурой.

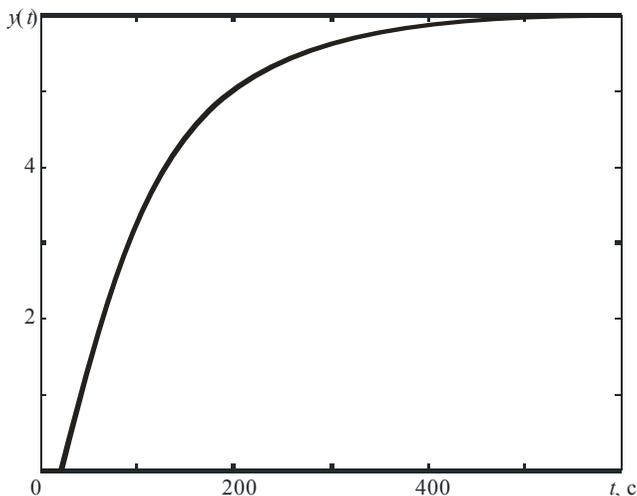


Рис. 6.1. Кривая разгона объекта управления

**Идентификация объекта управления.** По виду кривой разгона определяем, что она имеет апериодический характер с явно выраженным запаздыванием, следовательно, динамику протекающего процесса в объекте управления можно аппроксимировать передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{k \exp(-\tau p)}{T_{об} p + 1}.$$

Величину запаздывания  $\tau$  определим как величину времени, в течение которого выходная величина объекта управления остается неизменной при изменении воздействия на входе объекта. Из рис. 6.1 находим, что  $\tau = 23,4$  с. Коэффициент передачи объекта управления определим как разницу между установившимся значением выходной координаты объекта управления после изменения воздействия на входе и ее установившимся значением до изменения входного воздействия. В результате получаем

$$k = 6 \frac{\text{Размерность регулируемой величины}}{\text{Размерность регулирующего воздействия}}.$$

И наконец, постоянную времени объекта управления определяем по формуле

$$T_{06} = \frac{t_{0,7} - \tau}{1,2} = 97,7 \text{ с},$$

где  $t_{0,7}$  – время, при котором ордината  $y(t)$  достигает значения  $0,7k$ .

**Анализ динамических характеристик.** По полученной математической модели объекта управления построим основные его динамические характеристики, при этом будем пользоваться системой MATLAB.

Зададим lti-объект в форме

```
>> w = tf(6, [97.7 1], 'td', 23.4)
```

Переходный процесс объекта управления построим с помощью функции `step(w)`. Результат представлен на рис. 6.2.

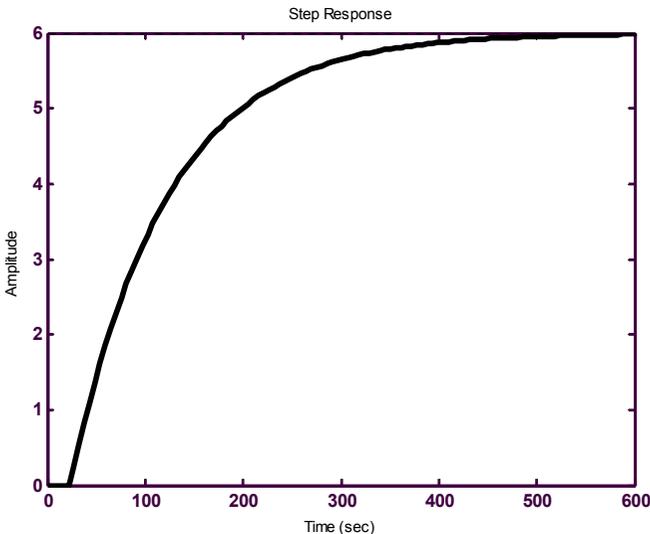


Рис. 6.2. Переходный процесс объекта управления

Амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики (АЧХ и ФЧХ) объекта построим с помощью функции `bode(w)`, установив в свойствах диаграммы Боде единицы измерения (вкладка «Units») для амплитуды –

абсолютное значение, а для частоты изменив шкалу на линейную. Результат представлен на рис. 6.3.

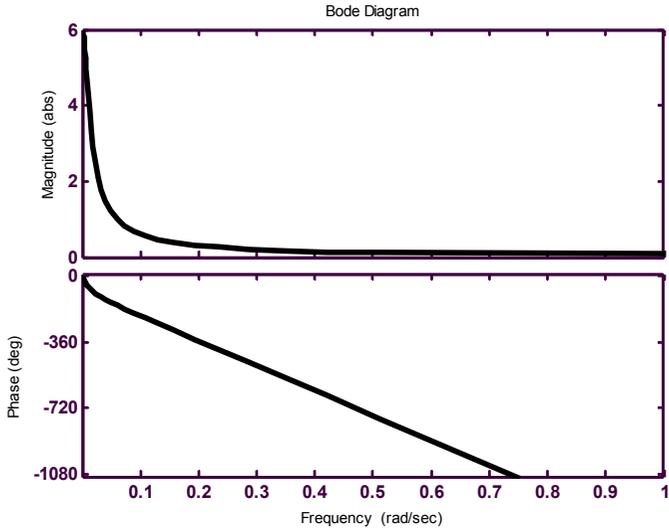


Рис. 6.3. АЧХ и ФЧХ объекта управления

Амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) построим с помощью функции `nyquist(w)`. Результат представлен на рис. 6.4.

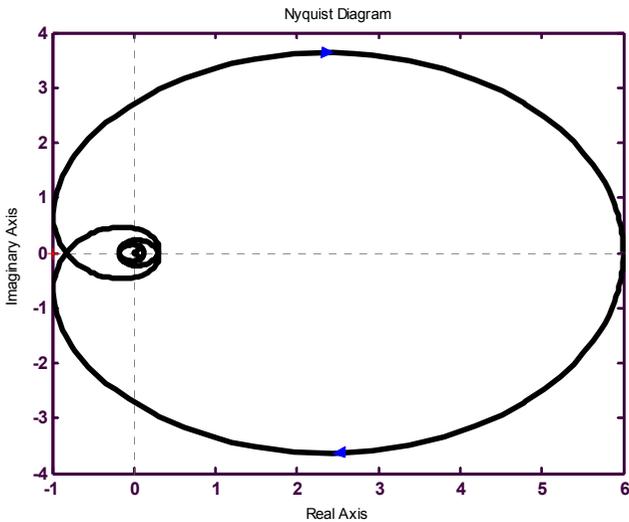


Рис. 6.4. АФЧХ объекта управления

Фазовую траекторию объекта управления при нулевых начальных условиях построим с помощью системы Simulink, составив структурную схему (рис. 6.5) и произведя моделирование, результат которого представлен на рис. 6.6.

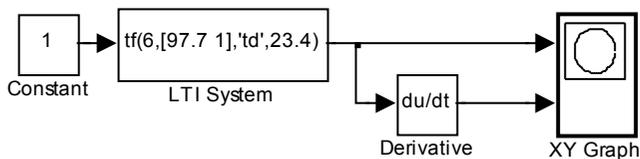


Рис 6.5. Структурная схема модели

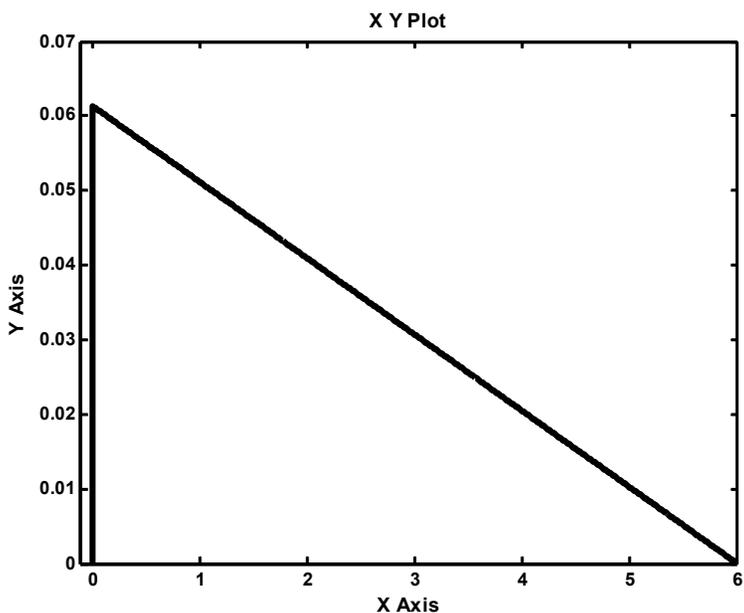


Рис. 6.6. Фазовая траектория объекта управления

**Выбор технологического объекта управления.** По табл. 1.1 определяем, что полученное математическое описание объекта управления вполне может принадлежать тепловому объекту. Поэтому, произведя информационный поиск [10], выбираем в качестве объекта управления технологический участок доменной печи.

Доменная печь – агрегат для восстановительно-тепловой обработки оксидов металлов, представленных в виде различных природных руд и отходов производства. Продуктами доменной плавки являются чугун или ферросплавы, шлак, газ, колошниковая пыль. Назначение печи – производство восстановительного газа в максимально достижимых размерах в единицу времени и эффективное использование тепловой и химической энергии восстановительного газа. Производство восстановительного газа ограничено предельным значением подъемной силы газового потока, прекращающей нормальный сход шихтовых материалов в шахтной печи.

*Основной технологической задачей* доменной плавки является восстановление железных руд и получение чугуна заданного состава и температуры. Доменная печь относится к классу шахтных печей, в которых осуществляется слоевой режим работы с противотоком обрабатываемого материала, заполняющего весь рабочий объем печи, и горячих газов, фильтрующихся через сравнительно плотные слои этих материалов.

*Основная задача автоматического управления* доменным процессом заключается в создании наиболее благоприятных условий для протекания восстановительных процессов. При этом доменная печь работает с максимальной производительностью и экономичностью при ограничениях, обусловленных качеством сырья, мощностью воздуходувных машин, ресурсами кислорода, природного газа, состоянием печи, вспомогательного оборудования и др.

Основная задача управления может быть разделена на ряд локальных (частных) задач, решение которых позволяет выбрать и стабилизировать рациональные режимы работы печи. В частности, к этим задачам относятся:

1. Управление шихтоподачей.
2. Управление тепловым режимом печи.
3. Управление распределением газовых потоков в столбе шихтовых материалов.
4. Управление сходом шихты (ходом печи).

Хотя все процессы, протекающие в печи, взаимосвязаны, указанные задачи в определенной мере автономны, и поэтому такое разделение достаточно обосновано.

Недостаточность и запаздывание информации затрудняют управление процессом плавки.

Следует отметить еще одну особенность доменной печи как объекта автоматического управления: технологический процесс проходит во всем объеме печи, а управление сосредоточено на границах шахты печи.

Управление «сверху» осуществляется на колошнике путем изменения условий загрузки, а «снизу» – из фурменной зоны изменением параметров дутья (рис. 6.7).

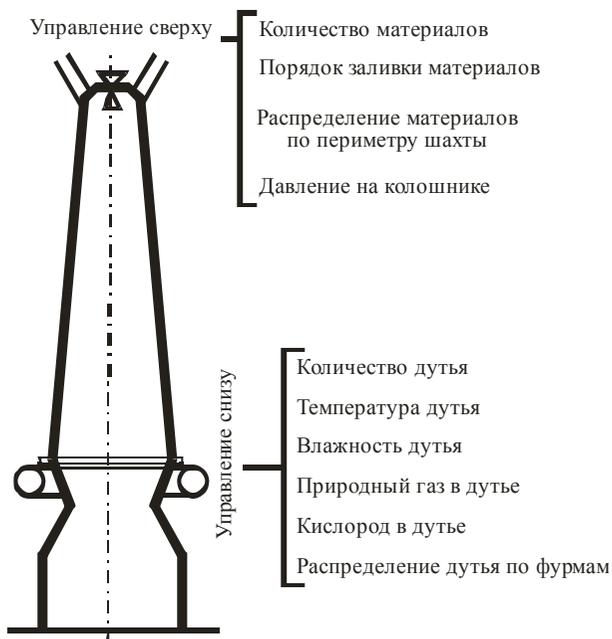


Рис. 6.7. Схема управляющих воздействия доменной плавки

Доменные печи, как правило, длительное время работают в стационарных производственных условиях, выплавляют чугун одной и той же марки, работают на идентичном сырье, что позволяет выбрать оптимальный для этих условий режим работы. Задача систем управления заключается в выборе этого режима и затем в компенсации флуктуаций входных параметров процесса, которые сравнительно невелики. Другим благоприятным фактором является большая аккумулирующая способность печи. Огромная масса материалов, участвующих в процессах массо- и теплообмена, способствует улаживанию возмущающих воздействий. В этом смысле печь как бы является фильтром для возмущающих воздействий.

Инерционность процесса позволяет иметь некоторый резерв времени для выбора рационального управления.

Контрольно-измерительная аппаратура, установленная на доменных печах, позволяет получить доступную для измерения рабочую информацию о технологическом процессе, а также о состоянии печи и вспомогательного оборудования. Кроме того, она должна обеспечить безопасность работы всех агрегатов, составляющих комплекс доменного производства.

Система контроля основных параметров доменного процесса представляет сложный комплекс датчиков, преобразователей и вторичных приборов. Количество щитов, пультов и стендов, на которых размещается эта аппаратура, непрерывно растет. Информация становится трудно обозримой, и персонал, обслуживающий печь, не в состоянии полностью использовать ее для оперативного управления процессом

Первым этапом автоматизации доменного производства явилось внедрение локальных систем регулирования отдельных параметров доменного процесса, что позволило освободить персонал печи от наблюдения за изменением важных для процесса величин и от необходимости принимать меры для их регулирования. В результате регулирования отдельных параметров были обеспечены условия для ровной, устойчивой и экономичной работы печи. Локальные системы решают следующие задачи:

- а) регулирование параметров комбинированного горячего дутья, поступающего в доменную печь;
- б) регулирование давления колошникового газа;
- в) управление нагревом воздухонагревателей печи.

Основным условием ровной, высокопроизводительной работы доменной печи является постоянство материального и энергетического режимов плавки.

Комбинированное горячее дутье, поступающее в печь, состоит из воздуха, кислорода, природного газа и водяного пара. Случайные изменения количества, состава или температуры горячего дутья вызывают нарушения материальных и энергетических условий доменной плавки и приводят к нежелательным последствиям. В то же время сознательные воздействия на параметры комбинированного дутья могут быть использованы для управления ходом доменной плавки (управление «снизу»). Поэтому выбор заданного значения того или иного параметра комбинированного дутья

является функцией управления, а регулирование этого параметра на заданном уровне – функцией локальных, регулирующих систем.

Основные параметры дутья, локальной системы автоматического регулирования:

1. Расход кислородно-воздушной смеси.
2. Расход кислорода (или концентрация кислорода в дутье).
3. Соотношение расходов природного газа и воздуха с учетом концентрации кислорода в дутье.
4. Распределение горячего дутья и природного газа по фурмам печи.
5. Температура горячего дутья.
6. Влажность дутья.

*Система регулирования температуры горячего дутья.* Энтальпия горячего дутья является важной статьей теплового баланса доменной плавки, поэтому регулирование температуры дутья на оптимальном для данных условий уровне дает значительный эффект.

Постоянство температуры дутья при прочих равных условиях способствует ровному высокопроизводительному ходу печи, при этом меньше колеблется температура в горне и стабилизируются химический состав и температура чугуна на выпусках. Изменение задания регулятору температуры дутья является наиболее простым и удобным методом коррекции при отклонениях теплового режима от оптимального.

Нагревом дутья можно в известной мере управлять газодинамикой процесса, так как при изменении температуры дутья изменяется объем, а следовательно, и скорость газового потока. Колебания температуры дутья допустимы в пределах, обусловленных аккумулялирующей способностью печи, однако резкое повышение температуры может вызвать резкое сокращение окислительной зоны у фурм, вследствие чего возможно подствывание гарниссажа в заплечиках и ухудшение условий схода шихтовых материалов в горне. Поэтому повышаются требования к точности регулирования температуры дутья.

Система регулирования температуры горячего дутья принципиально не отличается от типовой схемы регулирования температуры. Она состоит из термоэлектрического датчика, электронного потенциометра, регулятора с задатчиком, исполнительного механизма при смешительном клапане. Регулятор автоматически устанавливает такое соотношение горячего и холодного воздуха, поступающего в смешительный воздухопровод, при

котором в зоне установки термоэлектрического датчика поддерживается заданная температура горячего дутья.

Однако следует отметить некоторые особенности объекта, которые необходимо учитывать при проектировании и наладке системы автоматического регулирования температуры горячего дутья.

1. В системе возникают два типа существенно различных *возмущающих воздействий*:

а) резкое и глубокое возмущение при очередном переходе с остывшего на нагретый воздухонагреватель, вызванное тем, что смесительный клапан в этот момент полностью закрыт, а в смесительный воздухопровод поступает дутье с максимальной температурой;

б) монотонное, плавное возмущение, которое возникает после ликвидации последствий первого. В это время регулятор постепенно закрывает смесительный клапан, компенсируя снижение нагрева дутья по мере остывания воздухонагревателя.

2. Воздухонагреватели отличаются по своим характеристикам, их расположение относительно места установки датчика температуры несимметрично, что несколько изменяет динамические характеристики объекта.

3. Расход холодного воздуха через смесительный клапан при низких температурах дутья, которые возможны при разогреве печи или при специальных условиях, достаточно велик, поэтому сечение смесительного клапана приходится выбирать довольно большим. При этом рабочие характеристики смесительного клапана в нормальном режиме, при высокой температуре дутья оказываются неудовлетворительными. В этом случае предусматривается установка двух регулирующих заслонок: для высоких температур – меньшего диаметра (порядка 0,5 м), а для низких – большего (1,2 – 1,5 м). Переключение с одного клапана на другой может осуществляться автоматически или вручную специальным устройством.

Вследствие неравномерного распределения горячего и холодного воздуха по сечению смесительного воздухопровода наблюдается неравномерность температур воздуха в различных фурмах и затрудняется выбор представительной точки для измерения температуры дутья. На некоторых доменных печах предусматриваются специальные турбулизирующие устройства, улучшающие смешение воздуха перед его поступлением в кольцевой воздухопровод.

Выходной регулируемой величиной является температура горячего дутья, измеренная термопарой в стальном чехле. Входной величиной является положение смесительного клапана, следовательно, коэффициент передачи объекта управления будет иметь вид

$$k = 6 \frac{\text{град}}{\% \text{ хода ИМ}}.$$

*Для того чтобы предупредить недопустимое повышение температуры дутья в момент перехода с остывшего воздухонагревателя на нагретый, в современных схемах автоматического перевода воздухонагревателей предусматриваются временное отключение регулятора температуры дутья и выдача сигнала на открытие смесительного клапана. Регулятор температуры дутья включается через заданное время и доводит температуру до заданного значения без перегрева дутья.*

Особенности объекта управления и высокая точность регулирования температуры дутья вызывают необходимость принимать обоснованные технические решения при проектировании систем стабилизации температуры горячего дутья для каждой доменной печи.

**Синтез устройства управления.** Из полученных результатов при идентификации объекта управления следует, что в контуре управления существует звено транспортного запаздывания, следовательно, для синтеза СПС-регулятора будем использовать логический закон управления, описываемый выражением (4.6).

Изменить температуру на выходе объекта управления можно положением смесительного клапана, которое, в свою очередь, изменяется исполнительным механизмом. Поэтому при синтезе необходимо учитывать и динамику исполнительного механизма, описывающуюся передаточной функцией вида

$$W_{\text{им}}(p) = \frac{1}{T_{\text{им}} p},$$

где  $T_{\text{им}}$  – постоянная времени исполнительного механизма, выбираемая из технических характеристик конкретного образца, выпускаемого заводом-изготовителем. Примем для нашего расчета  $T_{\text{им}} = 15 \text{ с}$ .

Структурная схема синтезируемой автоматической системы регулирования представлена на рис. 6.8.

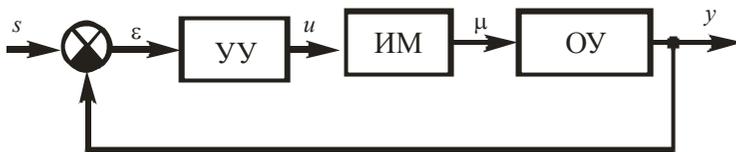


Рис. 6.8. Структурная схема АСР

Объект управления и исполнительный механизм соединены между собой последовательно, тогда передаточная функция приведенного объекта выглядит следующим образом:

$$W_{об}^*(p) = W_{об}(p)W_{им}(p) = \frac{k \exp(-\tau p)}{T_{об}T_{им}p^2 + T_{им}p}.$$

Задача синтеза управляющего устройства заключается в выборе соответствующих коэффициентов воздействия по координате ошибки, т.е. коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в логическом законе (4.6).

Обеспечим переходный процесс в системе с продолжительностью, близкой к величине  $t_p = 150$  с и  $\sigma \leq 15\%$  за счет сочетания конечного числа структур, отличных друг от друга лишь уровнем воздействия по координате ошибки. Найдем параметр  $\alpha = 0,074$  из уравнения гармонического баланса

$$\alpha W_{об}^*(p) = -1,$$

т.е. первая линейная структура при коэффициенте передачи регулятора  $\alpha$  выводит систему на границу устойчивости (рис. 6.9).

Тогда величину  $\beta = -0,006$  выберем из условия, что система в момент переключения на вторую линейную структуру должна быть охвачена положительной обратной связью и ее фазовая траектория направлена в противоположном направлении движения траектории первой линейной структуры (при коэффициенте  $\alpha$ ).

Для построения системы с перестраиваемой структурой, в которой реализуется описанный переходный процесс, необходимо найти закон изменения структуры в функции координат системы. При произвольном постоянном воздействии строим переходный процесс, выбрав моменты переключения  $t_1$  и  $t_p - \tau$ .

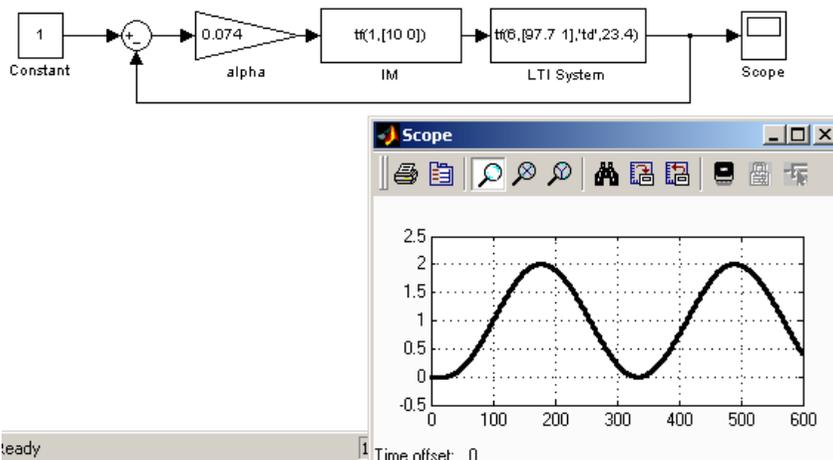


Рис. 6.9. Моделирование линейной структуры при коэффициенте  $\alpha$

В силу того, что каждая из рассматриваемых структур является линейной, для любого постоянного воздействия отношение  $(d\varepsilon/dt)/\varepsilon$  для различных процессов в моменты переключения будет неизменным. Следовательно, коэффициенты наклона прямых переключений (при  $t_1 = 120$  с) находятся из графиков ошибки регулирования и ее производной по формулам

$$c_1 = -\frac{d\varepsilon(t_1)/dt}{\varepsilon(t_1)} = 0,0028, \quad c_2 = -\frac{d\varepsilon(t_p - \tau)/dt}{\varepsilon(t_p - \tau)} = 0,017.$$

Модель устройства управления реализуем с помощью S-функции системы Simulink. Часть этой S-функции, отвечающая за вычисление алгоритма управления и вывод результата, представлена в листинге 6.1.

Л и с т и н г 6.1.

```
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
```

```
K = 0; %Обнуляем переменную
```

```
% u(1) - ошибка регулирования
```

```
% u(2) - производная от ошибки регулирования
```

```
s1 = sign(u(2) + 0.0028*u(1)); %Первая прямая переключения
```

```
s2 = sign(u(2) + 0.017*u(1)); %Вторая прямая переключения
```

```

if u(1)*s1>0
    K = 0.074; %Коэффициент передачи первой линейной структуры (альфа)
end
if s2*s1<0
    K = -0.006; %Коэффициент передачи второй линейной структуры (бета)
end
if u(1)*s2<0
    K = 0; %Система разомкнута
end

sys = K*u(1); %Вывод управляющего воздействия

```

Модель разрабатываемой системы автоматического регулирования представлена на рис. 6.10.

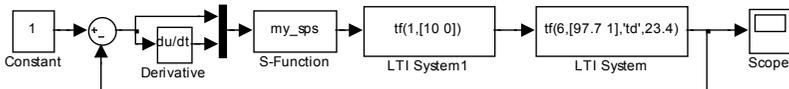


Рис. 6.10. Структурная схема модели АСР

Произведя моделирование, получаем реакцию системы (рис. 6.11, *a*) на задающее входное воздействие. На рис. 6.11, *б* представлено управляющее воздействие.

Получив переходный процесс в замкнутой системе автоматического регулирования, оценим его качество.

Склонность системы к колебаниям, а следовательно, и запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением регулируемой величины  $y_{\max}$  или так называемым перерегулированием:

$$\sigma = (A_{\max} - 1)/1 \cdot 100\% = 2,3 \%$$

Время регулирования  $t_p$  – время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от установившегося состояния не будет превышать некоторой наперед заданной величины  $\delta$  (обычно  $\delta = 0,05y(\infty) = 0,05 \cdot 1 = 0,05$ )

$$t_p = 150 \text{ с.}$$

Максимальная динамическая ошибка

$$A_{\max} = 0,023.$$

Степень затухания называется отношение разности двух соседних амплитуд, одного знака, к большей из них:

$$\psi = (A_1 - A_2)/A_1 = 1.$$

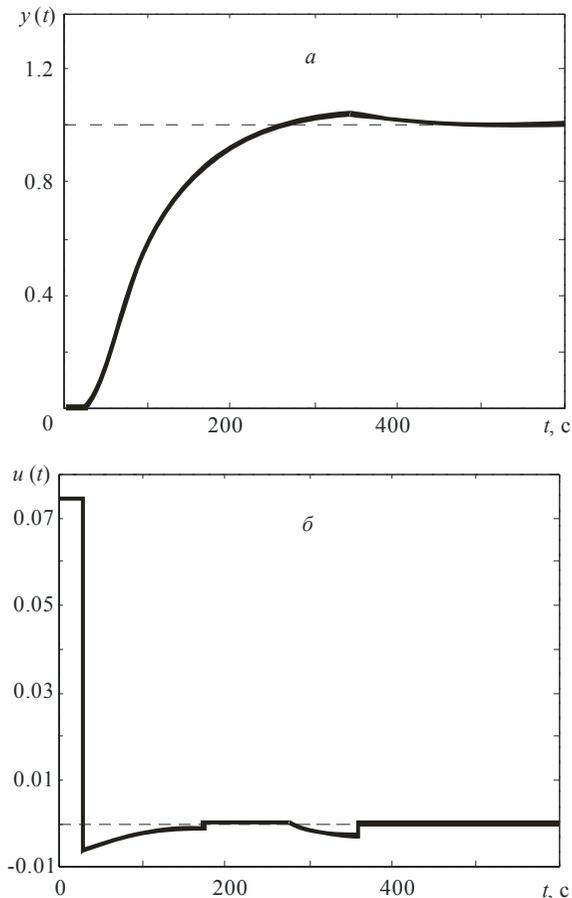


Рис. 6.11. Результаты моделирования

**Расчет оптимальных параметров ПИД-регулятора.** Для определения параметров ПИД-регулятора разработано обширное количество методов [2, 17, 22]. Воспользуемся методом Циглера – Никольса как одним из самых простых и менее трудоемких. Однако данный метод обеспечивает степень

затухания  $\psi \approx 0,8 - 0,9$ , поэтому после расчета воспользуемся специализированным пакетом системы Simulink – Nonlinear Control Design, служащим для динамической оптимизации систем управления.

Найдем критическую частоту приведенного объекта управления из условия

$$\Phi_{об}^*(\omega_{кр}) + \pi = 0, \quad \omega = 0,0201 \text{ с}^{-1}.$$

Найдем критическую настройку пропорциональной составляющей

$$S_1^{кр} = [A_{об}^*(\omega_{кр})]^{-1} = 1/13,9 = 0,0719.$$

Параметры ПИД-регулятора находим по формулам

$$k_p = 0,6 S_1^{кр} = 0,0432;$$

$$k_p / T_n = 0,192 S_1^{кр} \omega_{кр} = 0,000278;$$

$$k_p T_d = 0,471 S_1^{кр} / \omega_{кр} = 1,69.$$

Используя блок NCD Output, зададим качество переходного процесса с параметрами  $t_p \leq 150 \text{ с}$ ,  $\sigma \leq 15\%$  и установим рассчитанные значения в качестве начальных параметров регулятора. В результате получим следующие параметры ПИД-регулятора:

$$k_p = 0,0902;$$

$$k_p / T_n = 1e-10;$$

$$k_p T_d = 4,975.$$

Результат работы замкнутой системы автоматического регулирования с ПИД-регулятором, параметры которого были найдены с помощью блока NCD Output, представлен на рис. 6.12.

Основные показатели качества полученного переходного процесса:

перерегулирование –  $\sigma = 1,6 \%$ ;

время регулирования –  $t_p = 109 \text{ с}$ ;

максимальная динамическая ошибка –  $A_{max} = 0,0165$ ;

степень затухания –  $\psi = 0,75$ .

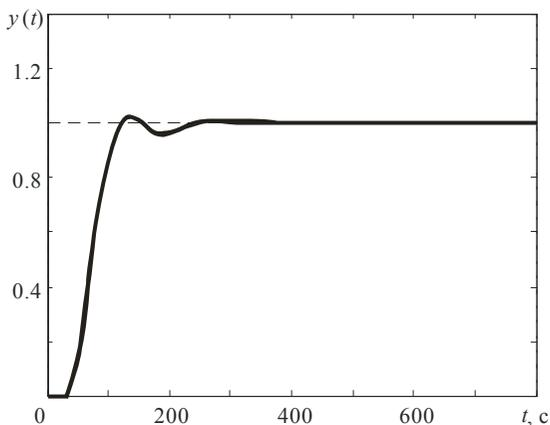


Рис. 6.12. Результат моделирования

**Сравнение СПС- и ПИД-регулятора.** Из полученных оценок качества переходных процессов следует, что оба регулятора обеспечивают высокое качество регулирования. В переходном процессе системы с ПИД-регулятором перерегулирование и время регулирования получились меньше, чем в системе с СПС-регулятором, а степень затухания – ниже. Однако следует учесть, что реализация СПС-регулятора значительно проще, чем ПИД. Кроме того, при использовании первого в управляющем воздействии отсутствует значение производной от ошибки регулирования, а присутствует только информация о ее знаке.

Во множестве промышленных объектов управления действуют параметрические возмущения, при действии которых медленно изменяются параметры объекта управления. Рассмотрим (табл. 6.1), как ведут себя оба типа регуляторов при параметрических возмущениях, вызывающих изменение постоянной времени объекта в пределах  $T_{об} \in [50; 150]$  с .

Т а б л и ц а 6.1

**Оценки качества регулирования**

Показатели качества	Тип регулятора					
	СПС при $T$ , с			ПИД при $T$ , с		
	50	97,7	150	50	97,7	150
$\psi$	1	1	1	0,07	0,75	1
$\sigma$ , %	0	2,3	4	9	1,6	13
$A_{\max}$	0	0,023	0,04	0,089	0,0165	0,129
$t_p$ , с	120	150	237	380	109	233

Результаты работы рассматриваемых систем автоматического регулирования при параметрических возмущениях представлены на рис. 6.13.

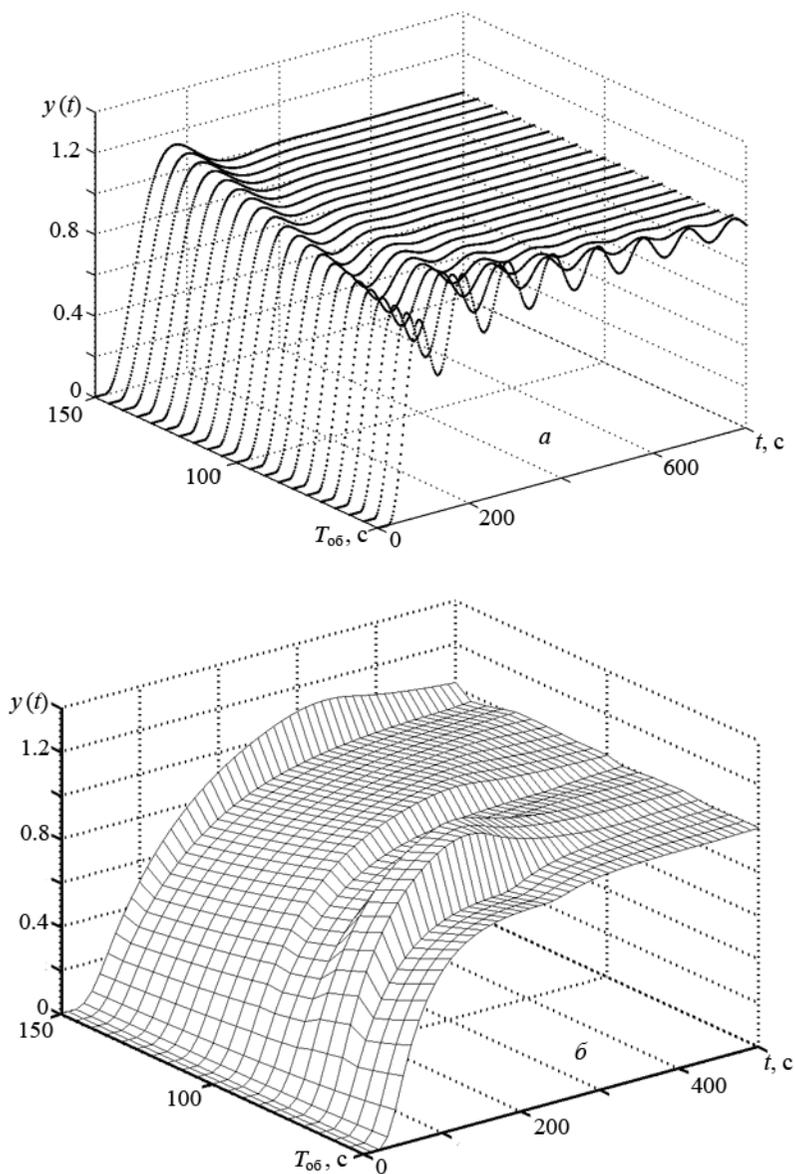


Рис. 6.13. Результаты моделирования

Таким образом, синтезированный СПС-регулятор, функционируя совместно с объектами, обладающими транспортным запаздыванием, позволяет добиться переходных процессов практически без перерегулирования с быстродействием, близким к системам, которые функционируют совместно с ПИД-регулятором. Применение принципов переменности структуры позволяет решить задачу высококачественного управления при действии на объект не поддающихся измерению параметрических возмущений.

## 7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие системы автоматического регулирования называются с переменной структурой?
2. Дайте определение фазовой траектории динамической системы.
3. Дайте определение фазового портрета динамической системы.
4. Какой режим работы СПС называется движение по вырожденной траектории?
5. Объясните факт устойчивых движений в СПС при использовании неустойчивых линейных структур.
6. Что такое идентификация переходного процесса объекта?
7. Как экспериментально снять кривую разгона объекта управления.
8. Почему при регулировании существенно снижается влияние возмущающих воздействий?
9. В каких случаях на фазовую плоскость наносят линии переключения?
10. Каким образом можно избавиться от статической ошибки системы автоматического регулирования?
11. Почему при исследовании динамических характеристик системы на ее вход подается единичная ступенчатая функция?
12. Какая система автоматического регулирования называется нелинейной?
13. Дайте определение автоматизации производства.
14. Дайте определение частичной автоматизации.
15. Дайте определение комплексной автоматизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. –СПб.: Наука, 1999. –467 с.
2. Андык В.С. Теория автоматического управления: Учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2004. –108 с.
3. Башкиров Д.А. Графоаналитический метод построения переходных процессов в системах автоматического регулирования. –Л.: ЛКВВИА, 1952. –124 с.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. –М.: Наука, 1972. –768 с.
5. Боднер В.А. Теория автоматического управления полетом. –М.: Наука, 1964. –700 с.
6. Дьяконов В.П. Simulink 4: Специальный справочник. –СПб.: Питер, 2002. –528 с.
7. Дэбни Дж., Харман Т. Simulink 4: Секреты мастерства: Пер. с англ. М.Л. Симонова. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. –403 с.
8. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. –М.: Наука, 1967. –336 с.
9. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. –М.: Наука, 1997. –352 с.
10. Каганов В.Ю., Блинов О.М., Беленький А.М. Автоматизация управления металлургическими процессами. –М.: Металлургия, 1974. –416 с.
11. Корилов А.М. Основы теории управления. –Томск: Изд-во НТЛ, 2002. –392 с.
12. Круг Е.К., Минина О.М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. –М.: Госэнергоиздат, 1962. –336 с.
13. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. –М.: Высш. шк., 1980. –287 с.

14. М а т е м а т и ч е с к и е модели технологических процессов и разработка систем автоматического регулирования с переменной структурой /Под ред. Б.Н. Петрова. –М.: Металлургия, 1964. –468 с.
15. М е д в е д е в В . С . , П о т е м к и н В . Г . Control System Toolbox: MATLAB 5 для студентов. –М.: ДИАЛОГ-МИФ, 1999. –287 с.
16. С т а р и к о в а М . В . Автоколебания и скользящий режим в системах автоматического регулирования. –М.: Машгиз, 1962. –195 с.
17. С т е ф а н и Е . П . Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. –376 с.
18. Т е о р и я систем с переменной структурой /Под ред. С.В. Емельянова. –М.: Наука, 1970. –592 с.
19. Т е х н и ч е с к а я кибернетика. Теория автоматического регулирования /Под ред. В.В. Солодовникова. –М.: Машиностроение, 1967. К1-3.
20. У т к и н В . И . Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. –М.: Наука, 1974. –272 с.
21. Ц ы п к и н Я . З . Основы теории автоматических систем. –М.: Наука, 1977. –560 с.
22. Ш и д л о в с к и й С . В . Теория автоматического управления: Учебное пособие. –Томск: Изд-во НТЛ, 2003. –40 с.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра информационно-измерительной техники (ИИТ)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. каф. ИИТ д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ А.А. Светлаков

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение курсовой работы по дисциплине АТПП

Студенту гр. \_\_\_\_\_

1. Тема работы: «Система автоматического регулирования технологическим процессом».

Срок сдачи \_\_\_\_\_

3. Исходные данные к работе

Дана кривая разгона объекта, полученная экспериментальным путем.

4. Необходимо:

4.1. Произвести идентификацию объекта управления по его переходной характеристике.

4.2. Произвести анализ полученной модели объекта управления (частотные, фазовые, временные характеристики).

4.3. Выбрать реальный технологический объект, описывающийся полученной моделью (рассмотреть влияющие факторы на технологический процесс, возмущения, ограничения).

4.4. В качестве устройства управления использовать \_\_\_\_\_

4.5. Произвести сравнительную оценку показателей качества переходных процессов разработанной системы с переменной структурой и системы с традиционным ПИД-регулятором.

Задание принял к исполнению / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Задание выдал / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

*Для заметок*

*Для заметок*

*Станислав Викторович Шидловский*

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

Учебное пособие

Редактор *Н.И. Шидловская*

---

Изд. лиц. ЛР № 04000 от 12.02.2001. Подписано в печать 25.08.05.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага белая писчая. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд.л. 6,51. Тираж 300 экз. Заказ

---

ООО «Издательство научно-технической литературы»  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а, тел. (3822) 53–33–35

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.